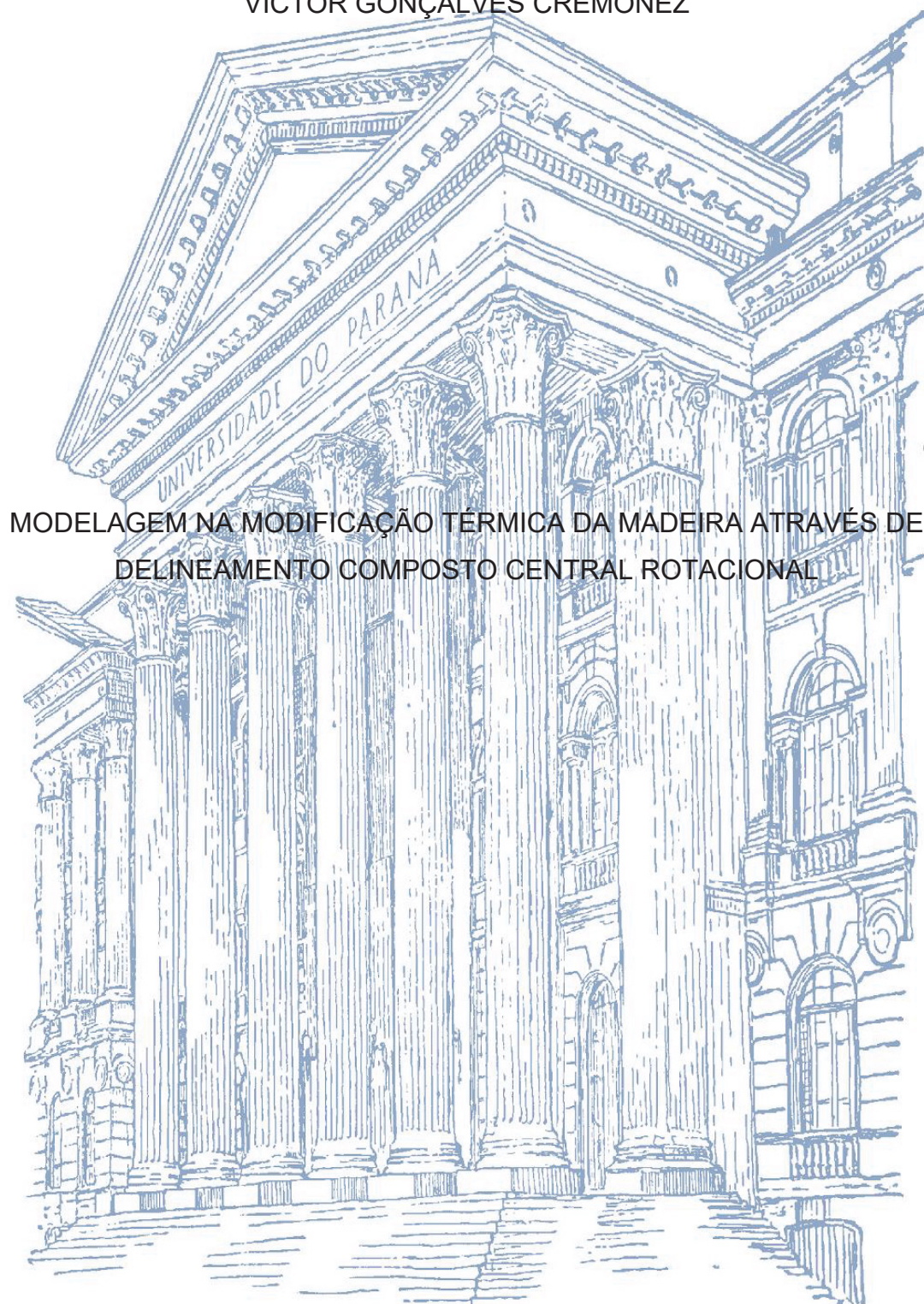


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR GONÇALVES CREMONEZ



MODELAGEM NA MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA ATRAVÉS DE
DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL

CURITIBA

2020

VICTOR GONÇALVES CREMONEZ

MODELAGEM NA MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA ATRAVÉS DE
DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientador: Prof. Dr. Dile Pontarolo Stremel

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Cremones, Victor Gonçalves

Modelagem na modificação térmica da madeira através de
delineamento composto central rotacional / Victor Gonçalves Cremones.
– Curitiba, 2020.

1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientadores: Prof. Dr. Dile Pontarolo Stremel

Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal. Defesa: Curitiba, 29/10/2020.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Madeira - Propriedades térmicas. 2. Madeira - Propriedades
mecânicas. 3. Pinus taeda. 4. Modelos matemáticos. 5. Teses.
I. Klitzke, Ricardo Jorge. II. Stremel, Dile Pontarolo. III. Matos, Jorge
Luis Monteiro de. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.812

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **VICTOR GONÇALVES CREMONEZ** intitulada: **MODELAGEM NA MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA ATRAVÉS DE DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL**, sob orientação do Prof. Dr. RICARDO JORGE KLITZKE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Outubro de 2020.

Assinatura Eletrônica
30/10/2020 11:01:19.0
RICARDO JORGE KLITZKE
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
30/10/2020 14:06:28.0
ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)

Assinatura Eletrônica
30/10/2020 00:14:27.0
DIMAS AGOSTINHO DA SILVA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
29/10/2020 22:58:12.0
ELAINE CRISTINA LENGOWSKI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO)

Assinatura Eletrônica
30/10/2020 08:35:35.0
ALEXANDRE BEHLING
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedicado a Tereza Becker (*in memorian*),
Hilson José Gonçalves dos Santos (*in memorian*), Gerson Cremonez(*in memorian*) e
Miguel Gonçalves dos Santos (*in memorian*), que mesmo não estando presentes
foram importantíssimos por toda a minha vida, conquistas e também a Maricélia
Gonçalves dos Santos, Edilson Eger e Franciny Paola Kolinski Pereira dos Santos,
por todo amor, confiança, dedicação e carinho aplicado a mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Maricelia Gonçalves dos Santos, por todo o carinho, esforço, dedicação, incentivo e amor aplicados a mim. Por ter abdicado de parte da sua vida por mim. Você é minha inspiração e sem você nada seria possível. Não há palavras para expressar em sua totalidade a minha gratidão, mas esse título também é seu.

Ao meu pai de criação Edilson Eger, por todo o suporte, dedicação, amor e por ter ajudado no meu desenvolvimento ao longo de praticamente toda minha vida. Esse título também pertence a você.

À minha companheira Franciny Paola Kolinski Pereira Santos, por toda a ajuda, paciência, por me ouvir e me apoiar nos momentos mais difíceis. Por ser compreensível nos momentos de ausência e por ter aceitado ao longo dos últimos quinze anos dividir sua vida comigo. Agradeço também a sua família, minha sogra Marizete Kasiorowski Kolinski, meu sogro Maurício Honorio Pereira dos Santos e meu cunhado Felipe Kolinski Santos, por sempre me apoiarem.

Aos meus tios Jucelia Terezinha da Silveira, Eron Antônio da Silveira, Joaquin Gonçalves dos Santos Neto, aos meus primos Jonathan Patrick da Silveira e Christopher Alexander Novacoski Santos por representarem o que é família, pelas conversas, pelo carinho e todo o suporte.

À Universidade Federal do Paraná, que desde o ensino médio me gerou várias oportunidades, muito aprendizado e fez parte da metade da minha vida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por ter me concedido uma bolsa de estudos para a realização do mestrado e doutorado.

Ao meu orientador Dr. Ricardo Jorge Klitzke, por ter me acolhido desde o mestrado, pelo exemplo de profissionalismo, dedicação a profissão e principalmente pela amizade que extrapola o meio acadêmico.

Ao meu coorientador professor Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos, por toda ajuda durante o mestrado e o doutorado. Agradeço também por ter acreditado em mim em um momento muito difícil da minha vida, dando-me confiança para prosseguir.

Ao meu coorientador professor Dr. Dile Pontarolo Stremel, pela imensa ajuda, amizade e ensinamentos durante a tese, por me apresentar a resolução principal para a realização desse trabalho. Sua ajuda foi essencial.

Ao meu amigo e colega de trabalho Dr. Rodrigo Medeiros Ribeiro, pelos conselhos, pelas inúmeras histórias, pela oportunidade de crescimento profissional, pela compreensão nos momentos difíceis, mas principalmente pela grande amizade ao longo de todos esses anos, te considero como um irmão. Por tudo isso, serei eternamente grato.

À Faculdade de Tecnologia de Curitiba e aos seus mantenedores, pela oportunidade de crescimento profissional e incentivo para a finalização da tese.

Ao superintendente e mantenedor da FATEC-PR, professor João Paulo Alves da Silva, por todos os ensinamentos, pelas oportunidades, por acreditar no meu potencial e principalmente por me proporcionar a chance de me tornar professor e gestor. Serei eternamente grato.

Aos colegas do Laboratório de Secagem da madeira, em especial ao Claudio Gumane Francisco Juizo, Douglas Edson Carvalho, Lineia Roberta Zen, Morgana Cristina França e Pedro Lício Loiola.

Aos colegas do Laboratório de Anatomia da Madeira, em especial a Eliane Lopes da Silva, Tawani Lorena Naide, Helena Cristina Vieira, Joilan Xipaia dos Santos e ao seu marido Deivison Venicio Souza, por toda ajuda na coleta e análise de dados.

À professora Dra. Silvana Nisgoski e a professora Dra. Graciela Ines Bolzón de Muniz, por terem me acolhido no Laboratório de Anatomia da Madeira desde a graduação e terem sido as primeiras a me darem uma oportunidade no meio acadêmico.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia da Madeira Ângela Maria Stüpp, Mariuci Torres dos Santos, Vinícius Rosa Schweitzer e ao professor Dr. José Guilherme Prata, por toda a ajuda na coleta de dados.

Aos colegas do Laboratório de Química da Madeira, em especial ao amigo Eraldo Antônio Bonfatti Junior, por todos os conselhos, conversas, ajuda na coleta de dados, artigos e principalmente pelo incentivo.

Aos professores e antigos coordenadores de curso, Dr. Alan Sulato de Andrade e Dr. Umberto Klock, por me concederem a oportunidade de trabalhar em vosso laboratório, pelo exemplo como profissionais e pela orientação no TCC.

Ao professor Dr. Márcio Pereira da Rocha, por já ter me orientado, me ajudado em sua gestão como coordenador da Pós-graduação e pelo exemplo de profissionalismo e caráter.

Aos antigos representantes de área, Dr. Dimas Agostinho da Silva e Dra. Ghislaine Bonduelle e aos representantes atuais Dra. Rosilani Trianoski e ao Dr. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori, pelo grande trabalho e apoio aos discentes do programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Ao professor Dr. Ivan Venson por ter sido meu tutor no PET, e ter me apresentando uma boa parte do caminho do que é Ensino, Pesquisa e Extensão.

Ao Dr. Walderson Klitzke, técnico do Laboratório de Cerâmica da UFPR, pela imensa ajuda na modificação térmica da madeira utilizada nesse estudo.

Ao servidor da Marcenaria da UFPR e colega de pós-graduação, Mauro Vitor Grecco Távora, por toda a ajuda e conselhos na preparação do material.

Aos servidores David Teixeira de Araújo, Reinaldo Mendes de Souza e Giovanna Micoski, por estarem sempre dispostos a ajudar e orientar.

Ao professor Dr. Renato Cesar Gonçalves Robert, por ter proporcionado duas das experiências mais incríveis da minha vida, tanto profissional quanto pessoal. Também agradeço pelos conselhos e amizade.

Ao professor Dr. Carlos Firkowski, pela ajuda em conseguir matéria prima para esse estudo.

Aos demais professores da Engenharia Industrial Madeireira e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Ao amigo Guilherme Avelino Teixeira Ferreira, primeiramente pela amizade construída desde o ensino médio que perdurou durante toda a graduação, mestrado e doutorado e também por toda ajuda durante a coleta de dados.

Aos amigos Lincoln Andrew Cordeiro e Wanderson Luis da Silva pela ajuda na coleta de dados.

Ao meu grande amigo e irmão Gustavo Lozano Côrtes, bem como, a sua esposa Eliani Paula Araújo Côrtes por tantos momentos especiais e que mesmo com uma distância continental, continuam me apoiando e me ajudando.

Aos amigos de graduação e pós-graduação, Clériston Sidnei Martins, Diego Gongora Barbosa, Elisa Pizzaia Goltz Kumov, Emilin Joma da Silva, Gustavo Branco Medici, Jéssica Aline Bueno Pasquini, Julio Veiga, Klaus Werner Felipe Hilgenstieler, Lucas Carvalho Costa, Lucas Machado, Nikalay Nikalaevitch Marangoni Kumov, Rafael Oliveira Brown, Tobias Cabral Negrão, Yuri Marlon Strzeleski Wodzik e Wagner Augusto Nazari.

À empresa Berneck, pela concessão do material utilizado nesse estudo.

Aos amigos da Escola Técnica da Universidade Federal do Paraná, Carlos Andrade, Heitor Silvério dos Reis, Luan Diego Paduano, Luã Cavalcanti dos Santos, Lucas Trindade Santana e Matheus Lauriano, por toda a amizade criada durante esse percurso e por participarem de toda essa história junto à UFPR.

Aos amigos de infância do Azaléia, por representarem as minhas raízes, por todas as histórias e amizade. Que esses laços possam durar a vida toda.

Dedico esse trabalho a Gerson Cremonéz (*in memorian*), meu pai, por tudo que representou para família e amigos, até o final de sua vida.

Dedico esse trabalho homenageando o Gilberto Fernando da Silva (*in memorian*), pela amizade, ensinamentos e dedicação durante o meu mestrado.

A todos o meu mais sincero obrigado.

*“If you try to remember you will lose! Empty your mind. Be formless, shapeless, like water. Put water into a cup, it becomes the cup. Put water into a teapot, it becomes the teapot. Water can flow, or creep, or drip, or crash.
Be water, my friend”*

Bruce Lee

RESUMO

A modificação térmica da madeira melhora a estabilidade dimensional, resistência biológica e altera a cor, podendo agregar valor a esse produto. Em contrapartida, com o aumento da temperatura e tempo de exposição há um decréscimo nas propriedades mecânicas desse material. Conhecer o comportamento da madeira perante a esse tratamento é de extrema importância para aplicações cotidianas e disseminação dessa tecnologia. O delineamento composto central rotacional é uma metodologia de planejamento de experimentos que visa melhorar, facilitar e otimizar processos, utilizando uma menor quantidade de tratamentos e repetições amostrais. Quando há significância estatística nos modelos gerados por esse tipo de delineamento, é possível criar modelagens gráficas tridimensionais e curvas de nível para facilitar a visualização e aplicação dos resultados. Diante desse pressuposto, o objetivo dessa tese é aplicar a técnica de delineamento composto central rotacional e metodologia de superfície de resposta para a predição e otimização das propriedades tecnológicas da madeira de *Pinus taeda*, submetida a modificação térmica. Para isso, foi realizado um delineamento composto central rotacional, em cinco níveis de temperatura e tempo de exposição. Foram realizadas análises experimentais das propriedades físicas: perda de massa, teor de umidade de equilíbrio, inchamento linear e volumétrico, coeficiente de retratibilidade, coeficiente de anisotropia, taxa de absorção de água e eficiência anti-inchamento; propriedades mecânicas: flexão estática, compressão paralela as fibras e dureza Janka; e por fim, propriedades colorimétricas: parâmetros L^* , a^* , b^* , C^* , h^* e ΔE . Após isso, foi realizada uma análise de regressão e análise de variância, validando estatisticamente os modelos, criando superfícies tridimensionais, curvas de nível, e quando possível e necessário, foram encontrados os pontos otimizados. Como resultados foi possível criar e validar modelos preditivos para as seguintes propriedades: perda de massa, teor de umidade de equilíbrio higroscópico, inchamento linear radial, inchamento linear tangencial, inchamento volumétrico, coeficiente de retratibilidade tangencial, coeficiente de retratibilidade volumétrico, taxa de absorção de água, eficiência anti-inchamento, massa específica aparente básica, massa específica anidra, ângulo de contato, flexão estática, compressão paralela as fibras, dureza janka e parâmetros colorimétricos. Não foi possível validar os modelos para inchamento linear longitudinal, coeficiente de retratibilidade radial, coeficiente de retratibilidade longitudinal, anisotropia de inchamento, massa específica básica e massa específica saturada. A temperatura foi a variável que teve maior influência sobre as propriedades que o tempo de exposição a modificação térmica. Foi possível encontrar os críticos para a taxa de absorção de água, massa específica básica e aparente anidra, módulo de ruptura e módulo de elasticidade da flexão estática e da compressão paralela às fibras.

Palavras-chave: Superfície de resposta, Pontos centrais, Propriedades tecnológicas da madeira.

ABSTRACT

The thermal modification of the wood improves the dimensional stability, biological resistance and changes the color, being able to add value to this product. On the other hand, with the increase in temperature and exposure time there is a decrease in the mechanical properties of this material. Knowing the behavior of wood in the face of this treatment is extremely important for everyday applications and the dissemination of this technology. The central rotational composite design is an experiment planning methodology that aims to improve, facilitate and optimize processes, using a smaller number of treatments and sample repetitions. When there is statistical significance in the models generated by this type of design, it is possible to create three-dimensional graphic models and contour lines to facilitate the visualization and application of the results. Given this assumption, the objective of this dissertation is to apply the rotational central composite design technique and response surface methodology for the prediction and optimization of the technological properties of *Pinus taeda* wood, submitted to thermal modification. For this, a central rotational composite design was carried out, in five levels of temperature and time of exposure. Experimental analyzes of physical properties were performed: loss of mass, equilibrium moisture content, linear and volumetric swelling, retractability coefficient, anisotropy coefficient, water absorption rate and anti-swelling efficiency; mechanical properties: static bending, compression parallel to the fibers and janka hardness; and finally, colorimetric properties: parameters L^* , a^* , b^* , C^* , h^* and ΔE . After that, a regression analysis and analysis of variance was performed, statistically validating the models, creating three-dimensional surfaces, contour lines, and when possible and necessary, the optimized points were found. As a result, it was possible to create and validate predictive models for the following properties: mass loss, hygroscopic equilibrium moisture content, radial linear swelling, tangential linear swelling, volumetric swelling coefficient, tangential retractability coefficient, volumetric retractability coefficient, absorption rate of water, anti-swelling efficiency, apparent specific gravity, anhydrous specific gravity, contact angle, static bending, fiber parallel compression, janka hardness and colorimetric parameters. It was not possible to validate the models for longitudinal linear swelling, radial retractability coefficient, longitudinal retractability coefficient, anisotropy coefficient, basic apparent specific gravity and saturated specific gravity. The temperature had a greater influence on the properties than the exposure time. It was possible to find the critics for the water absorption rate, basic and apparent anhydride density, rupture modulus and elastic modulus of static flexion and compression parallel to the fibers.

Keywords: Response surface, Central points, Technological properties of wood.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MODELO GERAL DE UM PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO	22
FIGURA 2 - (A) E (D) ANÁLISE UNIVARIADA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL; (B) E (E) MATRIZ COM TODAS AS COMBINAÇÕES TRIDIMENSIONAIS E BIDIMENSIONAIS; (C) E (F) DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL.....	23
FIGURA 3 – EXEMPLIFICAÇÃO DA ROTACIONALIDADE E DA HIPERESFERA NO DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL	26
FIGURA 4 – EXEMPLO DE MODELO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LINEAR	30
FIGURA 5 – EXEMPLO DE MODELO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA QUADRÁTICA	30
FIGURA 6 – DEGRADAÇÃO DOS COMPONENTES DA MADEIRA COM O AUMENTO DE TEMPERATURA.....	33
FIGURA 7 – DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA.....	34
FIGURA 8 – CONFIGURAÇÃO DE EXPERIMENTOS.....	40
FIGURA 9 – FORNO UTILIZADO PARA A MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA	41
FIGURA 10 – GRÁFICO TEMPERATURA X TEMPO PARA A MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA	42
FIGURA 11 – PREPARO DOS CORPOS DE PROVA	43
FIGURA 12 - GONIÔMETRO KRÜSS, MODELO DROP SHAPE ANALYSIS (DAS).....	48
FIGURA 13 – ENSAIOS MECÂNICOS DE FLEXÃO ESTÁTICA, COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS E DUREZA JANKA.....	50
FIGURA 14 – DIAGRAMA COLORIMÉTRICO PELO SISTEMA CIE L*A*B	51
FIGURA 15 – COLETA DE DADOS COLORIMÉTRICOS.....	52
FIGURA 16 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A PERDA DE MASSA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE.....	63
FIGURA 17 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVAS DE NÍVEL PARA O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	63
FIGURA 18 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO LINEAR RADIAL MÁXIMO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE .	70
FIGURA 19 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO LINEAR TANGENCIAL MÁXIMO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	71
FIGURA 20 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO VOLUMÉTRICO MÁXIMO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE .	72
FIGURA 21 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE TANGENCIAL DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	77

FIGURA 22 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	78
FIGURA 23 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	84
FIGURA 24 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	85
FIGURA 25 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A MASSA ESPECÍFICA APARENTE BÁSICA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	92
FIGURA 26 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A MASSA ESPECÍFICA ANIDRA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	92
FIGURA 27 – EXEMPLOS DOS ENSAIOS DE ÂNGULO DE GOTA E O SEU COMPORTAMENTO NAS FACES RADIAL E TANGENCIAL DA AMOSTRA TESTEMUNHA E O TRATAMENTO 10 (200°C E 2,5 HORAS)	96
FIGURA 28 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE RADIAL EM 5 SEGUNDOS DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	100
FIGURA 29 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE RADIAL EM 30 SEGUNDOS DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	101
FIGURA 30 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE TANGENCIAL EM 5 SEGUNDOS DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	102
FIGURA 31 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE TANGENCIAL EM 30 SEGUNDOS DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	103
FIGURA 32 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE RUPTURA) DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE ...	110
FIGURA 33 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	111
FIGURA 34 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE RUPTURA) DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	112
FIGURA 35 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	113
FIGURA 36 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A DUREZA JANKA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	114

FIGURA 37 – INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COR DAS AMOSTRAS DE <i>PINUS TAEDA</i> L.	119
FIGURA 38 – GRÁFICO DE REFLECTÂNCIA x COMPRIMENTO DE ONDA PARA O ESPECTRO DA LUZ VISÍVEL.....	120
FIGURA 39 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L* DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	125
FIGURA 40 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO A* DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	126
FIGURA 41 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO B* DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	127
FIGURA 42 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C* DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE.....	128
FIGURA 43 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO H* DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	129
FIGURA 44 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO ΔE DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	130

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DEMONSTRAÇÃO DA PARTE FATORIAL DE UM DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL COM DUAS VARIÁVEIS CODIFICADAS	25
TABELA 2 – VALORES DE α PARA ATÉ SEIS FATORES DE ENTRADA	26
TABELA 3 – DEMONSTRAÇÃO DA PARTE AXIAL DE UM DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL COM DOIS FATORES.....	27
TABELA 4 – VALORES DE α PARA ATÉ SEIS FATORES DE ENTRADA EM VARIÁVEIS CODIFICADAS E NÃO CODIFICADAS	39
TABELA 5 – NÍVEIS EM CADA CODIFICAÇÃO PARA A TEMPERATURA E O TEMPO	40
TABELA 6 – RESUMO DAS NORMAS E PROCEDIMENTOS UTILIZADAS.....	44
TABELA 7 – MATRIZ BÁSICA PARA O CÁLCULO DOS MODELOS DE REGRESSÃO QUADRÁTICOS CODIFICADOS	53
TABELA 8 – PARÂMETROS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	55
TABELA 9 – PARÂMETROS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA SIMPLIFICADOS	56
TABELA 10 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS DE PERDA DE MASSA E PARA O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO COM O AMBIENTE DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	58
TABELA 11 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA PERDA DE MASSA E TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE	60
TABELA 12 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE PERDA DE MASSA DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	61
TABELA 13 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	61
TABELA 14 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA INCHAMENTO LINEAR E INCHAMENTO VOLUMÉTRICO DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE.....	65
TABELA 15 – ANOVA PARA O INCHAMENTO LINEAR E VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE.....	67
TABELA 16 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO LINEAR RADIAL DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE.....	68
TABELA 17 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO LINEAR TANGENCIAL DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE.....	69
TABELA 18 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO VOLUMÉTRICO DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE.....	69
TABELA 19 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA COEFICIENTES DE RETRATIBILIDADE DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	73
TABELA 20 – ANOVA PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE LINEAR E VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE	75

TABELA 21 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE TANGENCIAL DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	76
TABELA 22 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICO DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	76
TABELA 23 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA COEFICIENTE DE ANISOTROPIA, TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	80
TABELA 24 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA A ANISOTROPIA DE INCHAMENTO, TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE	82
TABELA 25 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	83
TABELA 26 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	83
TABELA 27 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	87
TABELA 28 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE	89
TABELA 29 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE BÁSICA DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	90
TABELA 30 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE MASSA ESPECÍFICA ANIDRA DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	91
TABELA 31 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA MOLHABILIDADE (ÂNGULO DE CONTATO) DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	95
TABELA 32 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA MOLHABILIDADE E ÂNGULO DE CONTATO DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE	97
TABELA 33 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE RADIAL A 5S DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	98
TABELA 34 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE RADIAL A 30S DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	99
TABELA 35 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE TANGENCIAL A 5S DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	99
TABELA 36 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE TANGENCIAL A 30S DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	99
TABELA 37 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA, COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS E DUREZA JANKA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	105

TABELA 38 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA A FLEXÃO ESTÁTICA, COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS E DUREZA JANKA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE	107
TABELA 39 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE RUPTURA) DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	108
TABELA 40 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	108
TABELA 41 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE RUPTURA) DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	108
TABELA 42 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	109
TABELA 43 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE DUREZA JANKA DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	109
TABELA 44 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA COLORIMETRIA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	117
TABELA 45 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA OS PARÂMETROS DE COR DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE	121
TABELA 46 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L* DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	122
TABELA 47 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO A* DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	123
TABELA 48 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO B* DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	123
TABELA 49 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C* DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	123
TABELA 50 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO H* DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	123
TABELA 51 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO ΔE DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADA TERMICAMENTE	124
TABELA 52 – TABELA DE ANOVA PARA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SATURADA DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L. MODIFICADO TERMICAMENTE	164

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
1.1.3 Objetivos secundários	20
2 REVISÃO TEÓRICA	21
2.1 Planejamento experimental	21
2.1.1 Delineamento de experimentos.....	21
2.1.2 Delineamento composto central rotacional.....	24
2.1.3 Metodologia de superfície de resposta.....	29
2.2 MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA.....	31
2.2.1 Propriedades tecnológicas da madeira modificada termicamente	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1 DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL	38
3.2 MATÉRIA-PRIMA E PREPARO DO MATERIAL.....	40
3.3 MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA.....	41
3.4 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA	43
3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS	45
3.5.1 Perda de massa	45
3.5.2 Teor de equilíbrio higroscópico e taxa de absorção de água	45
3.5.3 Inchamento linear e inchamento volumétrico	46
3.5.4 Anisotropia de inchamento e coeficiente de retratibilidade.....	47
3.5.5 Molhabilidade e ângulo de gota.....	48
3.5.6 Massa específica.....	48
3.5.7 Propriedades mecânicas	49
3.5.8 Propriedades colorimétricas	50

3.6 CONSTRUÇÃO DO MODELO COM BASE NO PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL.....	52
3.7 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CÁLCULO DOS PONTOS CRÍTICOS.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1 PERDA DE MASSA E TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO	58
4.2 INCHAMENTO LINEAR E VOLUMÉTRICO.....	65
4.3 COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE.....	73
4.4 ANISOTROPIA DE INCHAMENTO, TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO	79
4.5 MASSA ESPECÍFICA.....	87
4.6 MOLHABILIDADE	94
4.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	105
4.8 PROPRIEDADES COLORÍMETRICAS.....	117
4.9 EXEMPLO SIMPLIFICADO DE APLICAÇÃO	133
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	135
5.1 CONCLUSÕES	135
5.2 RECOMENDAÇÕES	137
REFERÊNCIAS	138
APÊNDICES.....	148

1 INTRODUÇÃO

A busca por materiais sustentáveis tem uma demanda cada vez maior no mundo, e o apelo por materiais com baixo consumo de energia e baixas emissões de carbono são cada vez mais comuns. A madeira apesar de ser um dos materiais mais antigos utilizados pela humanidade, possui características singulares, que fazem seu uso continuar a ser essencial (HILL, 2006).

Por possuir uma relativa facilidade de trabalhabilidade, boa resistência mecânica, singularidade estética e bom isolamento térmico, a madeira possui uma ampla gama de utilização, mas que se usada de forma incorreta, pode ser subutilizada. Uma grande vantagem em relação a materiais sintéticos é o fato dela ser biodegradável e renovável, ou seja, ela retorna no ciclo bioquímico natural (BATISTA, 2012).

A madeira é biodeteriorável pelo fato de ser um material orgânico, contudo se espera que ela possua maior durabilidade natural para seu uso, sendo que cada espécie tem uma resistência biológica diferente. Antes do desenvolvimento tecnológico de processos químicos para preservação da madeira, a humanidade já usava processos físicos para melhorar as características do material. Os Vikings aqueciam as camadas externas das embarcações para melhorar a durabilidade (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003). Os japoneses utilizavam desde meados do século XVII uma técnica chamada yakisugi ou shou sugi ban, que consiste em queimar a superfície da madeira, tornando-a menos suscetível a ataques de organismos xilófagos, incêndio e umidade. A madeira tratada com essa técnica pode durar entre 80 e 100 anos sem manutenção (EBNER; STELZER; BARBU, 2019).

A modificação térmica da madeira altera e agrega algumas propriedades importantes como: maior estabilidade dimensional, diferenciação colorimétrica, maior durabilidade biológica, entretanto, algumas propriedades mecânicas decrescem. Por esse motivo, é importante a realização de estudos que visem otimizar e viabilizar esse processo, em especial no Brasil (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

A Europa é pioneira em tecnologias para modificação térmica em escala industrial, tendo cinco processos patenteados mais conhecidos, porém por motivos de segredo, os detalhes não são divulgados. No Brasil há somente um processo nessa escala, realizado pela empresa TW Brasil chamado VAP HolzSysteme®, o que

demonstra a grande escassez no país (JÄMSÄ; VIITANIEMI, 2001; MILITZ; TJEERDSMA, 2001; RAPP; SAILER, 2001; SYRJÄNEN, 2001; VERNOIS, 2001, BATISTA, 2012).

Em escala laboratorial o tema é pesquisado desde a década de 30, mas no Brasil teve início somente na década de 80, se ampliando em 90. Considerando o fato de o país ter um grande potencial de florestas plantadas e um baixo desenvolvimento nessa tecnologia aplicado a indústria, é de fundamental importância estudos relacionados a modificação térmica. O processo para modificação térmica, não possui uma norma específica e nem uma metodologia padrão para os trabalhos que são publicados (BATISTA, 2012).

Na grande maioria dos trabalhos não são apresentados detalhes técnicos de modificação térmica, como rampas de aquecimento e rampas de tratamento. As temperaturas, tempo de tratamento, adição de componentes químicos e catalizadores são realizados de forma empírica e replicadas quando atinge os resultados aplicáveis a indústria ou à academia científica.

O planejamento experimental pode ser utilizado na otimização de processos, na minimização de custos e tempo, em que é possível estudar o efeito de vários fatores sobre uma variável de resposta (MONTGOMERY, 2017). O delineamento composto central rotacional é uma ferramenta muito utilizada em diversas áreas da tecnologia, embora ainda seja pouco usado nas pesquisas de tecnologia da madeira, engenharia industrial madeireira e engenharia florestal.

O delineamento composto central rotacional além de ajudar a prever o comportamento do tratamento térmico na madeira para cada uma das propriedades, pode ainda ser usado para se otimizar uma superfície de resposta nas variáveis de interesse. O que pode ser interessante na escolha desse procedimento é o fato de se utilizar poucos tratamentos e poucas repetições, quando comparado a outras modelagens, o que torna a técnica mais aplicável industrialmente, menos onerosa, podendo também ser replicada para outras espécies ou outras condições (RODRIGUES; IEMMA, 2014). Entretanto, por se tratar de madeira, pode haver a necessidade de aumentar um pouco a amostragem ou repetições, para garantir que o modelo seja aplicável.

A madeira de *Pinus* tem potencial tecnológico para ser modificada termicamente, e quando comparada ao gênero *Eucalyptus* tem menor heterogeneidade. Dessa forma, para efeito de comparação e buscando uma maior

validade desta tese, pode ser interessante a aplicação da técnica de delineamento composto central rotacional para a modificação térmica nessa espécie.

Diante desse pressuposto o objetivo dessa tese é aplicar a técnica de delineamento composto central rotacional e metodologia de superfície de resposta para a predição e otimização das propriedades tecnológicas da madeira de *Pinus taeda* L., submetida a modificação térmica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver superfícies de resposta e modelos estatísticos para a predição das propriedades tecnológicas da madeira de *Pinus taeda* L. modificada termicamente, utilizando o delineamento composto central rotacional (DCCR).

1.1.2 Objetivos específicos

Para atender a esse objetivo foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

Realizar a modificação térmica da madeira de *Pinus taeda* em diferentes combinações de tempo e temperatura (variáveis independentes) delineadas a partir de um delineamento fatorial composto central rotacional (DCCR);

Avaliar as respostas da modificação térmica nas propriedades tecnológicas como: propriedades físicas, propriedades mecânicas e propriedades colorimétricas da madeira de *Pinus taeda* ;

Analisar, interpretar, ajustar e validar modelos estatísticos para cada uma das propriedades tecnológicas;

Analisar as superfícies de resposta dos modelos, visando uma otimização de processos (pontos críticos), com base nas características desejadas com a modificação térmica na madeira;

1.1.3 Objetivos secundários

Visando ampliar e demonstrar a importância do trabalho, mesmo não sendo convencional, mas por liberdade poética do autor na tese, alguns objetivos secundários foram estabelecidos:

Demonstrar que é possível aplicar a metodologia de superfície de resposta e o delineamento composto central rotacional a trabalhos da área de ciências florestais e da madeira;

Incentivar a disseminação de estudos voltados a modificação térmica da madeira aplicados ao pinus;

2 REVISÃO TEÓRICA

A revisão teórica foi realizada em duas partes principais: sendo a primeira sobre planejamento experimental, a qual foi direcionada para que haja entendimento do que é o delineamento composto central rotacional, a metodologia de superfície de resposta e qual sua importância; e por fim, sobre a modificação térmica da madeira, visando explicar as tecnologias envolvidas nesse tratamento, a relação com as propriedades tecnológicas da madeira, sobretudo, aplicada ao *Pinus taeda* L.

2.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

2.1.1 Delineamento de experimentos

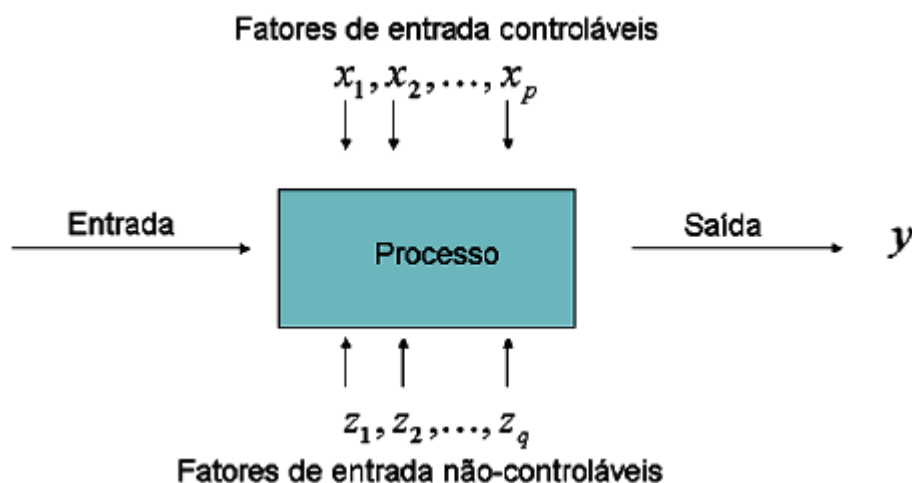
Segundo Montgomery (2017) o DOE (*design of experiments*) ou delineamento de experimentos é um planejamento formal para a condução de um experimento, ou seja, são testes idealizados de forma planejada com a finalidade de alterar os fatores de entrada, que também podem ser chamados de variáveis controladas e avaliar os impactos sobre uma variável de resposta. Essa técnica foi desenvolvida entre 1920 e 1930 por Sir Ronald Fisher em uma pesquisa no *Rothamsted Agricultural Experiment Station*, situado em Londres, que se mostrou inovadora no uso dos métodos estatísticos na análise de dados.

Para realizar uma pesquisa experimental, à medida que a quantidade de variáveis independentes cresce, o número de testes que devem ser realizados aumenta de forma exponencial. Sendo assim, para melhor aproveitamento de recursos e tempo, no planejamento de qualquer experimento se deve primeiro decidir quais os fatores serão investigados, bem como, as respostas de interesse (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS, 2010)).

Dessa forma, o DOE pode ser uma importante ferramenta na otimização de processos, avaliando o efeito que as variáveis independentes têm sobre as respostas obtidas nos experimentos (RODRIGUES; IEMMA, 2014). Essa otimização é obtida com a busca de técnicas sistemáticas principalmente na minimização de custos e tempo, ou na maximização de rendimento principalmente para as indústrias

(MONTGOMERY, 2017). A Figura 1 demonstra a relação das variáveis independentes, dependentes e dos fatores.

FIGURA 1 – MODELO GERAL DE UM PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO



FONTE: adaptado de Montgomery (2017).

Colombari (2004) e Montgomery (2017) definem que um planejamento de experimentos pode ser estruturado da seguinte forma: conhecer o problema; definir os fatores, níveis e variabilidade; selecionar as variáveis de resposta; escolher o projeto experimental; realizar o experimento; analisar os dados e por fim, extrair as conclusões e resultados do trabalho com base nas inferências estatísticas. Para isso, é importante a definição de alguns termos:

Fatores ou variáveis independentes: São características de entrada no experimento, que podem ser variadas, como por exemplo, temperatura, tempo, umidade relativa, entre outros;

Níveis: É a faixa de variação de um fator, como por exemplo para a temperatura em dois níveis, 140°C e 200°C;

Tratamento: é a combinação de cada fator com cada um dos níveis;

Fatores de ruído: São variáveis as quais não se tem controle, que podem ou não influenciar a resposta;

Variável de resposta ou variável dependente: É a variável que apresentará as respostas em cada tratamento.

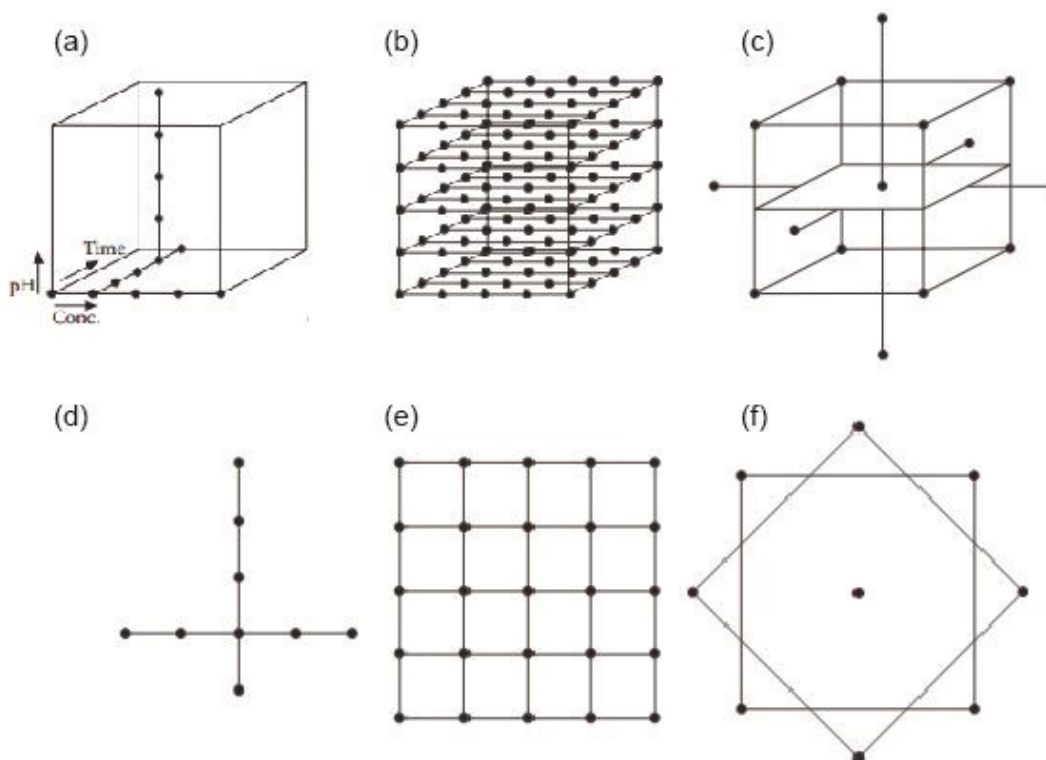
Matriz de experimentos: É o plano formal construído para conduzir os experimentos.

Repetição: É o processo de se repetir cada uma das combinações dos tratamentos;

Galdamez (2002) relata que muitas vezes, torna-se necessário analisar a influência de um ou mais fatores na resposta em que se deseja buscar. Sendo assim, quando é necessário avaliar o efeito de um fator, recomenda-se utilizar a técnica de planejamento de experimentos completamente aleatorizados. Por outro lado, quando for mais importante investigar o efeito provocado por dois ou mais fatores, é recomendável utilizar técnicas como: delineamento fatorial completo, delineamento fracionado ou ainda delineamento composto central (GALDAMEZ, 2002; RODRIGUES; IEMMA, 2014; MONTGOMERY, 2017).

No mesmo sentido, Haaland (1989) em experimentos de duas ou três variáveis recomenda três maneiras diferentes de conduzir o delineamento experimental. São elas: Análise univariada; matriz com todas as combinações e o delineamento composto central rotacional (DCCR). A Figura 2 demonstra espacialmente o comportamento do delineamento com três e dois fatores nesses métodos, respectivamente.

FIGURA 2 - (A) E (D) ANÁLISE UNIVARIADA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL; (B) E (E) MATRIZ COM TODAS AS COMBINAÇÕES TRIDIMENSIONAIS E BIDIMENSIONAIS; (C) E (F) DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL.



FONTE: Adaptado de Halaand (1989); Adaptado de Rodrigues e Iemma (2014).

O método de Análise Univariada (Figura 2a e Figura 2d), também conhecido como “*one-at-a-time*”, trata-se de um procedimento onde é avaliada uma das variáveis e fixada as demais. Esta técnica é a mais difundida e usual no campo científico e industrial, entretanto, possui limitações, pois não seria possível detectar os efeitos de interações entre as variáveis, tornando as condições restritas a uma região (HAALAND, 1989; RODRIGUES; IEMMA, 2014).

O estudo da matriz fatorial completa ou com todas as combinações, referente à Figura 2b e Figura 2e, é aplicada em todo o espaço experimental, todavia, tem a grande desvantagem de necessitar um número grande de experimentos, o que pode ser oneroso para ser replicado em indústrias (HAALAND, 1989; RODRIGUES; IEMMA, 2014). Em geral, os planejamentos fatoriais 2^k são os mais utilizados.

A Figura 2c e a Figura 2f demonstra uma solução intermediária entre as duas anteriores e podem ser utilizadas para que haja um menor número de experimentos e ainda explorar todo o espaço experimental. Nesse método, é possível calcular um modelo estatístico, que se for validado estatisticamente, pode ser usado para obtenção de uma superfície de resposta e através dessa análise determinar as condições otimizadas. Quando há pelo menos três repetições nos pontos centrais é factível calcular o erro experimental (HAALAND, 1989; RODRIGUES; IEMMA, 2014).

Para exemplificar, conforme é possível observar ainda na Figura 2d, Figura 2e e Figura 2f no planejamento de dois fatores, a análise univariada necessitaria 9 ensaios, o fatorial 25, enquanto o DCCR nas mesmas condições necessitaria 11 tratamentos, incluindo três repetições no ponto central. Os autores Rodrigues e Iemma (2014) recomendam no caso de duas ou três variáveis o uso do delineamento composto central rotacional (DCCR), conhecido também como planejamento fatorial com pontos axiais ou ainda planejamento estrela.

2.1.2 Delineamento composto central rotacional

Os autores Teófilo e Ferreira (2006); Lima (2009); Lima e Bueno Filho (2010) afirmam que entre os mais utilizados para ajuste de modelos de superfície de resposta (MSR), está o delineamento composto central (DCC) que foi preconizado por Box e Wilson em 1951. Segundo Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), Barros Neto,

Scarmínio e Bruns (2010) e Galdamez e Carpinetti (2004) o planejamento fatorial 2^k (dois níveis e k fatores) com pontos centrais, consiste em adicionar um ponto de experimentação no nível intermediário aos níveis investigados das variáveis de entrada que forneça informações uteis sobre o comportamento das respostas entre os níveis inicialmente atribuídos aos fatores. Quando são adicionados os pontos axiais, se torna o delineamento composto central rotacional.

Nesse sentido, mais especificamente o DCCR é importante, pois pode apresentar uma resposta ótima para o modelo, com um número menor de tratamentos em relação ao fatorial completo (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009; FONTES, 2012).

Para descrever melhor o funcionamento desse tipo de delineamento 2^k , é necessário dividi-lo em três partes: fatorial, axial e pontos centrais (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010). O número de experimentos pode ser calculado com a Equação 1, em que k é o número de fatores e PC a quantidade dos pontos centrais (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

$$\text{Número de tratamentos} = 2^k + 2k + \text{PC}$$

Equação 1

A primeira parte pode ser chamada fatorial ou cúbica, que varia em x_i fatores, com $i=1\dots k$, considerando também os dois níveis codificados (-1,1), que totaliza $t = 2^k$ tratamentos. A Tabela 1 demonstra a quantidade de tratamentos para dois fatores e dois níveis. Segundo Galdamez (2002), Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009) a codificação ou normalização é conveniente, pois facilita e uniformiza a construção do planejamento, remove a medida das unidades dos fatores de controle e a distância entre os eixos.

TABELA 1 – DEMONSTRAÇÃO DA PARTE FATORIAL DE UM DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL COM DUAS VARIÁVEIS CODIFICADAS

Tratamento	Variável 1	Variável 2
1	1	1
2	-1	1
3	1	-1
4	-1	-1

FONTE: O autor (2020).

A segunda parte pode ser chamada de axial (ou estrela), sendo a quantidade de tratamentos calculada com $t = 2k$, na qual são utilizadas as coordenadas nula, α e $-\alpha$. O valor de α pode ser calculado com a Equação 2, em que k é o número de fatores. A Tabela 2 resume os valores de α entre dois e cinco fatores (BARROS NETOS; SCARMÍNIO; BRUNS, 2010; RODRIGUES; IEMMA, 2014).

$$\pm\alpha = \pm\sqrt[4]{2^k} \quad \text{Equação 2}$$

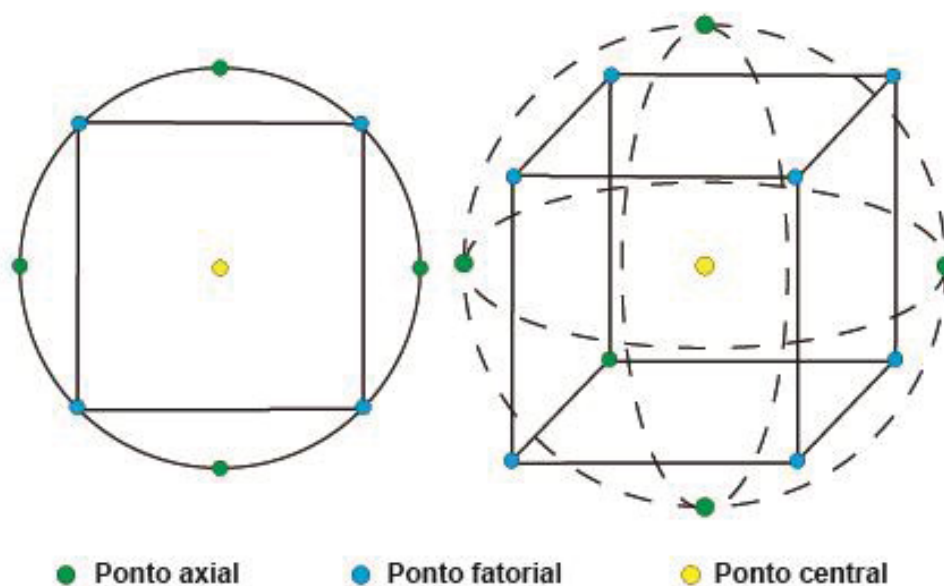
TABELA 2 –VALORES DE α PARA ATÉ SEIS FATORES DE ENTRADA

k	2	3	4	5	6
α	$\pm 1,41$	$\pm 1,68$	$\pm 2,00$	$\pm 2,38$	$\pm 2,82$

FONTE: O autor (2020).

O conceito de rotacionalidade foi proposto por Box e Hunter em 1957, citado por Barros Neto, Scarmínio e Bruns (2010), para se definir o valor de α . Um delineamento pode ser considerado rotacional se a variância de suas estimativas só depender da distância de α em relação ao ponto central, ou seja, se a precisão da resposta for a mesma em todos os pontos de uma “hiperesfera” com o centro dela sobrepondo o centro do experimento. A Tabela 3 demonstra os tratamentos na parte axial. A Figura 3 expõe o conceito de hiperesfera e rotacionabilidade.

FIGURA 3 – EXEMPLIFICAÇÃO DA ROTACIONALIDADE E DA HIPERESFERA NO DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL



FONTE: O autor (2020).

TABELA 3 – DEMONSTRAÇÃO DA PARTE AXIAL DE UM DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL COM DOIS FATORES

Tratamento	Variável 1	Variável 2
1	$-\alpha$	0
2	α	0
3	0	$-\alpha$
4	0	α

FONTE: O autor (2020).

Na terceira parte são considerados os pontos centrais, ou seja, os pontos na coordenada nula (0,0). Segundo Rodrigues e lemma (2014) o número de pontos centrais pode ser arbitrário, entretanto, mais de um teste no ponto central é importante para o cálculo dos resíduos, erro puro e melhorar o ajuste do modelo. O ponto central ajuda também a melhorar a aproximação do modelo em não linear, quando se busca uma superfície de resposta, como por exemplo em modelos quadráticos.

Baseado em Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010), Santos (2014) e Rodrigues e lemma (2014); Montgomery

(2017); pode-se considerar os passos para metodologia de superfície de resposta sendo:

- a) Definição da função objetiva;
- b) Definição dos fatores de entrada;
- c) Elaboração do delineamento composto central rotacional;
- d) Realização dos experimentos;
- e) Análise dos efeitos dos fatores nas respostas desejadas;
- f) Construção dos modelos e interpretação dos resultados;
- g) Verificação da validade dos modelos utilizando Análise de Variância - ANOVA;
- h) Ajuste de modelos;
- i) Análise de Superfície de Resposta: definição das faixas ótimas de operação.

A partir do DCCR é possível observar a influência dos fatores pela avaliação dos efeitos, erro padrão e da significância estatística (p-valor). Quanto maiores os valores dos efeitos estimados, maior sua influência, sendo que o sinal indica se é inversamente ou diretamente proporcional. O nível de significância do efeito do tratamento sobre uma variável de resposta está relacionado ao “p-valor”, e quando inferior a 0,05 (intervalo de confiança de 95%) indica que a variável estudada é significativa. Por fim, é possível através de uma análise de variância (ANOVA) verificar a significância da regressão e da falta de ajuste para o mesmo intervalo de confiança utilizando o teste F (GARCIA, 2013; SANTOS, 2014).

O teste F pode confirmar se o modelo é preditivo ou não. Nesse sentido, além de um R^2 elevado, o $F_{\text{calculado}}$ em relação aos resíduos deve ser maior que o F_{tabelado} , o que demonstra que a variação é explicada pela regressão e não pelos resíduos. Em contrapartida, o $F_{\text{calculado}}$ da falta de ajuste deve ser menor que o F_{tabelado} , pois o $F_{\text{calculado}}$ elevado indica falta de ajuste dos dados. Se o $F_{\text{calculado}}$ da falta de ajuste for maior que o F_{tabelado} , pode indicar que o erro puro é muito inferior a falta de ajuste, demonstrando uma grande repetição dos dados (GARCIA, 2013; SANTOS, 2014).

O DCCR é geralmente indicado para experimentos que tenham um baixo coeficiente de variação e condições com maior controlabilidade. Embora algumas propriedades da madeira sejam consideradas com um alto coeficiente de variação, Mendonça (2012) realizou um estudo sobre a influência desse coeficiente comparando um delineamento fatorial completo e um delineamento composto central rotacional, e concluiu que em variações de até 30% e mesmo com três repetições, o

DCCR pode apresentar resultados muito similares para o coeficiente de determinação (R^2), porcentagem de acerto para os coeficientes do modelo, porcentagem de acerto em superfície, distância entre o ponto crítico, entre outros.

2.1.3 Metodologia de superfície de resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta ou MSR (ou ainda *Response Surface Methodology*) pode ser definida como uma otimização de produtos e processos utilizando delineamento de experimentos (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009). Pode ser usado também para criar superfícies, demonstrando de uma forma visual o comportamento e a tendência entre as variáveis. Para identificar e ajustar um MSR apropriado a partir de dados experimentais, é necessário conhecimento de fundamentos estatísticos, delineamento experimental, técnicas de regressão, modelagem e otimização.

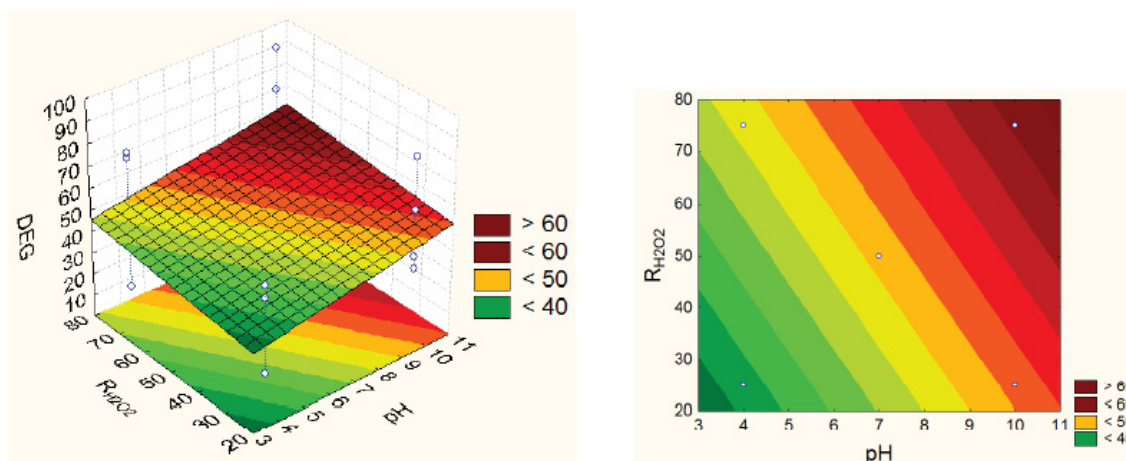
Apesar de ter sido desenvolvida na década de 50 por George Box, somente na década de 80 começou a ser amplamente aplicada na indústria, para a otimização de processos (GUEDES, 1996). Em processos industriais a metodologia de superfície de resposta apresenta ampla aplicação, pois nestes casos, é comum a existência de fatores ou variáveis que possam alterar a qualidade do produto final (SARAMAGO et al., 2008).

Existem diversas funções que podem ser aplicadas para a modelagem de uma superfície de resposta. Os polinômios algébricos são amplamente utilizados para esta finalidade, contudo, os polinômios de primeira e de segunda ordem são empregados na maioria dos casos. A função matemática que descreve a superfície de resposta é dada por $y=f(x_1,x_2,\dots,x_k)\beta_i+\varepsilon$ representam os fatores experimentais, y é a variável dependente (resposta), x variáveis de entrada, k é o número de variáveis independentes estudadas e ε é o erro aleatório associado à determinação experimental (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009). Geralmente é usado primeiramente um modelo linear de primeira ordem para tentar otimizar um processo. Este modelo pode ser observado na Equação 3 e ilustrado na Figura 4. Os valores de β referem-se aos coeficientes do modelo.

$$\bar{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$$

Equação 3

FIGURA 4 – EXEMPLO DE MODELO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA LINEAR



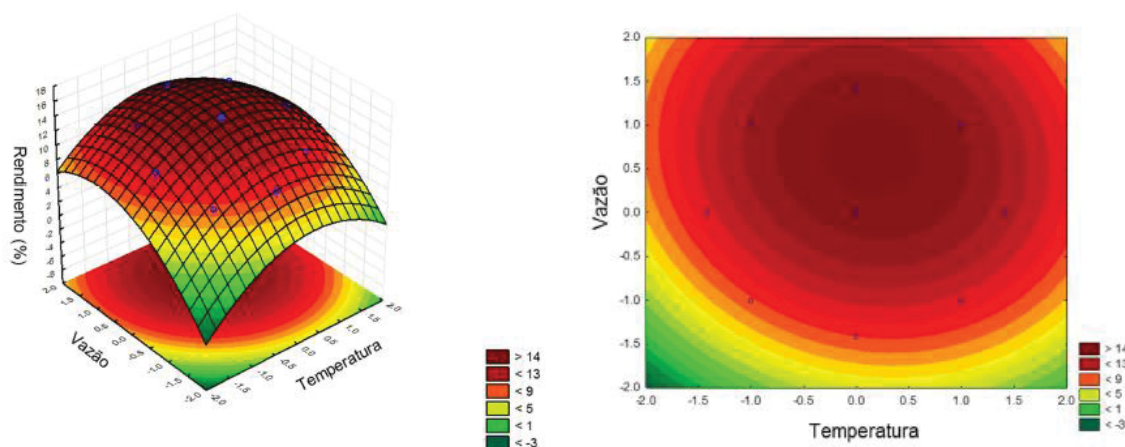
FONTE: Teodósio (2015).

Quando a análise de variância demonstra que o modelo linear não é o suficiente para ser preditivo, devido a presença de uma curvatura na superfície de resposta, é recomendado usar uma função polinomial de maior ordem, como o modelo quadrático, representado pela Equação 4 e ilustrado na Figura 5.

$$\bar{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

Equação 4

FIGURA 5 – EXEMPLO DE MODELO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA QUADRÁTICA



FONTE: Polidoro (2016).

2.2 MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA

Segundo Hill (2006) a madeira por ser um material natural possui uma grande variabilidade em suas propriedades tecnológicas. Entretanto, ainda no século XXI, tem uma vasta gama de utilização e aplicação, possuindo uma boa relação resistência mecânica por massa específica, singularidade estética, entre outros fatores. Nesse sentido, tecnologias que visam modificar as propriedades podem amplificar o uso desse material, sendo elas modificações químicas, de superfície, de impregnação ou térmicas.

Apesar de existirem estudos antigos, que são datados em meados de 1920 (ESTEVES; PEREIRA, 2009), o interesse na utilização de tratamentos térmicos na madeira vem crescendo, pois apresenta uma solução que pode substituir tratamentos químicos e tóxicos, resultando em um material que seja sustentável e renovável, que advém majoritariamente de florestas plantadas, ajudando na preservação de florestas nativas (BOONSTRA, 2008).

A modificação térmica da madeira pode ser definida como a aplicação de calor que resulta em degradação e alteração química do material, proporcionando maior estabilidade dimensional, durabilidade biológica, variação de cor, hidrofobicidade e diminuição de algumas propriedades mecânicas (HILL, 2006).

Batista (2019) dissertou acerca da uniformização e definição da terminologia utilizada para os processos denominados retificação térmica, termoretificação,

tratamento com calor, tratamento térmico e modificação térmica, concluindo e propondo que o último é o termo mais adequado para a língua portuguesa.

Segundo Homan et al. (2000), Militz e Tjeerdsma (2001), Hill (2006), Esteves e Pereira (2009), Batista (2012) as modificações térmicas utilizadas comercialmente e difundidas estão na Europa, sendo elas: “ThermoWood® Process” (na Finlândia), “Retification®” e “Le Bois Perdure®” (ambos na França), “Plato-Process®” (na Holanda) e “Oil-Heat-Treatment®” (na Alemanha). No Brasil, um processo utilizado em escala industrial é denominado de “Vap HolzSysteme®” (MIRANDA, 2010; LENGOWSKI, 2011; BATISTA, 2012; BELLON, 2013; GRIEBELER, 2013).

Para Mitchell (1988); Korkut e Guller (2008), a temperatura é a variável responsável pelo efeito mais forte na mudança das propriedades da madeira modificada termicamente. As variações mais consideráveis ocorrem em temperaturas entre 180 e 260°C, visto que temperaturas abaixo de 140°C provocam mudanças insignificantes na estrutura do material, enquanto temperaturas superiores a 260°C resultam em degradação indesejável (HILL, 2006). As variáveis que podem influenciar na modificação térmica são: tempo, temperatura, variáveis ambientais, espécie da madeira, tamanho da amostra e o uso de catalisadores. Ter o controle ou o conhecimento para poder projetar como a modificação térmica será realizada e como as propriedades serão influenciadas é de fundamental importância para as aplicações que o material terá após o tratamento. O DCCR pode ser de fundamental importância para difundir e facilitar o uso dessa tecnologia nas indústrias.

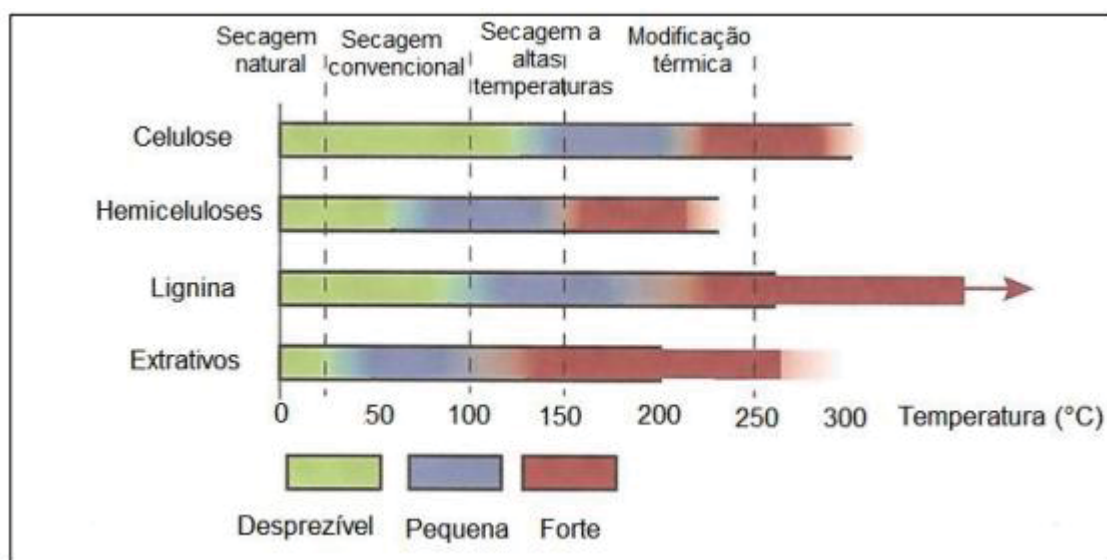
2.2.1 Propriedades tecnológicas da madeira modificada termicamente

Há diversos estudos que contribuíram para a evolução no entendimento do processo de modificação térmica e qual a sua interação com as propriedades tecnológicas, entre eles podem ser citados Stamm (1964), Mitchell (1988), Homan et al. (2000), Militz (2001), Rapp e Sailer (2001), Syrjänen (2001), Vernois (2001), Waskett e Selmes (2001), Alén et al. (2002), Rousset et al. (2004) e Metsä-Kortelainen et al. (2005), Hill (2006), Boonstra (2008), Korkut e Guller (2008), Esteves e Pereira (2009), Korošec et al. (2009), Militz e Altgen (2014) e Sandberg e Kutnar (2016). No Brasil podem ser destacados alguns estudos como: Vital e Della Lucia (1982), Vital (1983), Brito (1993), Quirino (1997), Pincelli (1999), Borges e Quirino (2004),

Calonego (2009), Miranda (2010), Lengowski (2011), Severo e Calonego (2011), Batista (2012), Cademartori (2012), Calonego et al. (2012), Severo et al. (2012), Bellon (2013), Griebeler (2013), Calonego (2017), França (2019) Juízo (2019) e por fim Távora (2019). Vale um destaque especial para o trabalho de Batista (2012), que foi uma das maiores e mais completas revisões de literatura já realizada sobre o assunto e também para a patente de Severo e Calonego (2011), que é um dos poucos trabalhos que demonstram as curvas de aquecimento para o processo.

Em consonância com esses autores é possível afirmar que temperaturas mais elevadas ocasionam degradação de alguns componentes químicos da madeira, mais especificamente da parede celular, alterando suas características. Essa degradação, apresenta comportamento diferenciado dependendo das condições do processo mudando de formas diferentes as propriedades tecnológicas (estabilidade dimensional, umidade de equilíbrio, cor, resistência mecânica, resistência biológica, hidrofobicidade, entre outras). É possível observar na Figura 6 as temperaturas de degradação dos componentes químicos predominantes na madeira.

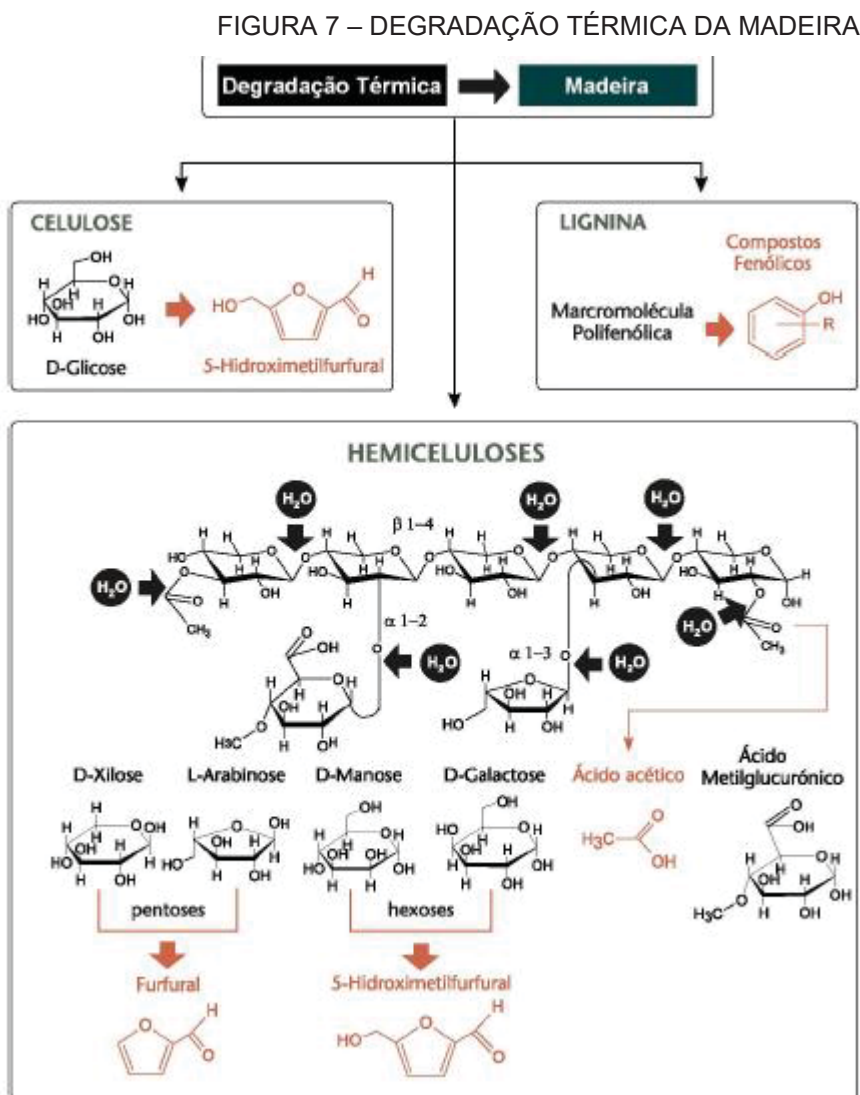
FIGURA 6 – DEGRADAÇÃO DOS COMPONENTES DA MADEIRA COM O AUMENTO DE TEMPERATURA



FONTE: Sundqvist (2004) modificado por Batista (2012).

O processo de modificação térmica degrada os grupos de acetilas da hemicelulose resultando na formação de ácidos carbônicos, principalmente ácidos acético e fórmico. Estes ácidos ajudam a catalisar reações de desacetilação da celulose e hemicelulose, bem como a desidratação, formando com isso, aldeídos

furfural e hidroximetilfurfural e diminuindo o grau de polimerização dessas moléculas como pode ser observado na Figura 7 (MILITZ; TJEERDSMA, 2001; MARTON et al., 2003; TJEERDSMA; MILITZ, 2005; HAKKOU et al. (2005); BOONSTRA; TJEERSDMA, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009).



FONTE: Marton et al. (2003) adaptado por Calonego (2017)

Pequenas porções de lignina são degradadas aumentando a concentração de grupos fenólicos, que reagem com os aldeídos (furfural e hidroximetilfurfural) formando um novo complexo polimérico. Outro fator importante a ser destacado é que essas reações, promovem um rearranjo estrutural entre a lignina e os polissacarídeos, diminuindo a possibilidade de adsorção de água, melhorando a estabilidade dimensional e aumentando a hidrofobicidade e diminuindo a porcentagem de umidade

de equilíbrio. Em outras palavras, a degradação diminui os grupos de hidroxilas OH disponíveis, ou sítios de absorção (MILITZ; TJEERDSMA, 2001; MARTON et al., 2003; TJEERDSMA; MILITZ, 2005; HAKKOU et al. (2005); BOONSTRA; TJEERSDMA, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009).

A maioria dos extrativos desaparece ou degrada durante o início da modificação térmica, em especial os mais voláteis, mas novos componentes consideráveis extraíveis são formados com as deteriorações dos carboidratos, fato esse que pode confundir em uma análise química de componentes da madeira, pois dependendo da temperatura essas novas substâncias podem ou não serem volatizadas (ESTEVES; PEREIRA, 2009). É possível afirmar que com a volatização de substâncias químicas esse processo também pode ocasionar perda de massa no material, por consequência diminuição na massa específica.

A alteração na cor da madeira está associada ao grau de cristalinidade, grau de polimerização, quantidade de grupos OH e ao rearranjo das substâncias extraíveis que migram para a superfície (CHOW; MUKAI, 1972; HILL, 2006; NUOPPONEN et al., 2006; DUBEY et al. 2012). Se a condição do tratamento térmico que a madeira ficar exposta for mais intensa, mais acentuada será a alteração na cor e o escurecimento (BEKHTA; NIEMZ, 2003; MITSUI et al., 2004). Moura e Brito (2011) afirmam que a modificação térmica agrega valor ao produto, sendo que a aparência visual e a cor pode ser um fator decisivo para o mercado consumidor (ESTEVES; PEREIRA, 2009), além de que tons escuros podem substituir o uso de madeiras nativas.

De uma maneira geral, a modificação térmica causa uma redução significativa e permanente nas propriedades mecânicas da madeira, tornando-a menos rígida ou mais friável, o que pode contrapor os benefícios e limitar o uso desse material. O aumento da temperatura ocasiona uma reorganização estrutural e perda de massa, principalmente com a degradação da hemicelulose, explicando o decréscimo nas propriedades mecânicas (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003, BATISTA, 2012).

Segundo Hill (2006) as folhosas demonstram ser mais afetadas mecanicamente que as coníferas, fato esse que pode impulsionar o uso da madeira de pinus no lugar do eucalipto para esse fim. Kartal, Hwang e Imamura (2008); Esteves e Pereira (2009); Calonego, Severo e Ballarin (2012) corroboram para ser afirmado que a compressão é menos afetada que os ensaios de flexão e de dureza.

A espécie mais utilizada quando o assunto é modificação térmica é o eucalipto, e por esse motivo é importante estudos que contribuam para a utilização do pinus.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para atender aos objetivos específicos a tese foi elaborada com seis etapas principais: delineamento composto central rotacional, coleta e preparo do material, modificação térmica da madeira baseado no delineamento, ensaios das propriedades tecnológicas da madeira modificada termicamente, aplicação dos resultados das propriedades nos modelos estatísticos e análise de superfície de resposta.

Visando uma avaliação mais precisa da influência das variáveis tempo e temperatura na modificação térmica da madeira de *Pinus taeda* L., utilizou-se o planejamento estatístico delineamento composto central rotacional (DCCR) e os resultados foram avaliados através da aplicação de Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e Análise de Resíduos. Foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- a) Através de um levantamento bibliográfico, selecionou-se os níveis (-1, 0 e 1) que seriam utilizados para a temperatura e para o tempo.
- b) Escolheu-se como método de Planejamento experimental o DCCR (HAALAND, 1989; MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009; BARROS NETOS; SCARMÍNIO; BRUNS, 2010; RODRIGUES; IEMMA, 2014) para duas variáveis. Ele consiste em um planejamento fatorial 2^2 com quatro ensaios (2×2), mais quatro pontos axiais e três pontos centrais (PC), totalizando onze experimentos, para avaliar a influência dos fatores, no qual as variáveis independentes foram: tempo e temperatura de modificação térmica. Vale ressaltar que foram utilizados para fins de comparação, ensaios na madeira não tratada.
- c) Realizou-se a modificação térmica da madeira de *Pinus taeda* L. com base no DCCR.
- d) Realizou-se os experimentos para as propriedades físicas (perda de massa, teor de umidade de equilíbrio, massa específica aparente, massa específica aparente básica, massa específica anidra, massa específica saturada, inchamento linear e volumétrico, coeficiente de anisotropia, coeficiente de retratibilidade, molhabilidade, taxa de absorção de água e eficiência anti-inchamento), mecânicas (compressão paralela as fibras, flexão perpendicular as fibras, dureza janka) e colorimétricas (CIELAB).
- e) Calculou-se os efeitos das variáveis (tempo e temperatura), os respectivos erros e analisou-se estatisticamente, a 95 % de limite de confiança ($p < 0,05$).

Realizou-se a análise de resíduos, que consiste: no teste de significância do ajuste do modelo, baseados na análise de variância (ANOVA), para verificar a qualidade desse ajuste; na determinação do coeficiente de determinação (R^2), que fornece uma medida da proporção da variação (através da equação de regressão); e no Teste F, que avalia se essa análise de regressão foi significativa ou não;

- f) Gerou-se as curvas de contorno e as superfícies de respostas para definir as faixas ótimas operacionais de cada variável.

3.1 DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL

Foram selecionadas como variáveis independentes o tempo de tratamento e a temperatura. Para o fator tempo, foi estabelecido como ponto central 2,5 horas, e para a temperatura 170°C. Os pontos centrais foram escolhidos com base em testes no equipamento (forno) e na espécie, na dissertação de Távora (2019), que realizou a modificação térmica em uma madeira de mesma espécie e origem deste trabalho, assim como, em um trabalho publicado por Juizo et al. (2018), em que os autores utilizaram o mesmo equipamento que foi utilizado nessa tese, e por fim, na literatura, Hill (2006) afirma que as modificações térmicas começam a ser significantes a partir de 140°C, o que também foi percebido nos testes preliminares. Alguns autores que trabalharam com modificação térmica (Wegener (1984); Sundqvist (2004); Forintek (2003); Hill (2006); Calonego (2009); Batista (2012); Cadermatori (2012); Bellon (2013) e Calonego (2017), obtiveram resultados interessantes entre 160°C e 180°C, o que também contribui para a escolha das temperaturas.

E por fim, tendo isso em vista, que em 140°C começa a modificação térmica e acima de 200°C a madeira entraria em combustão, esses foram os níveis baixos e alto (-1,41 e 1,41), respectivamente, escolhidos para os pontos axiais. Fazendo a média entre os dois, foi obtido o ponto central de 170°C (0), que também é interessante, pois está numa faixa que autores encontraram resultados satisfatórios. E os níveis 1 e -1 foram calculados tendo como base os pontos centrais e os axiais, utilizando uma regra de três simples.

Foi realizado um delineamento composto central rotacional (DCCR) completo 2^2 , incluindo 4 pontos fatoriais, 4 pontos axiais e 3 pontos centrais, totalizando onze

tratamentos. Contudo, por se tratar de madeira todos os ensaios foram realizados em triplicata, para assegurar uma maior confiabilidade e assertividade dos resultados. A utilização dos pontos centrais, permite estimar o erro experimental e testar a adequabilidade do modelo de segunda ordem. A Tabela 4 demonstra a escolha dos pontos fatoriais, centrais, axiais e para fins de comparação, testemunha o qual não passou por tratamento térmico.

TABELA 4 – VALORES DE ALPHA PARA ATÉ SEIS FATORES DE ENTRADA EM VARIÁVEIS CODIFICADAS E NÃO CODIFICADAS

Ensaio	Variáveis Codificadas		Variáveis Não Codificadas		
	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	t (min)
	(X1)	(X2)	(X1)	(X2)	(X2)
1	-1	-1	148,79	1,44	86,4
2	1	-1	191,21	1,44	86,4
3	-1	1	148,79	3,56	213,6
4	1	1	191,21	3,56	213,6
5	0	0	170	2,5	150
6	0	0	170	2,5	150
7	0	0	170	2,5	150
8	-1,41	0	140	2,5	150
9	0	-1,41	170	1	60
10	1,41	0	200	2,5	150
11	0	1,41	170	4	240
12	testemunha	testemunha	testemunha	testemunha	testemunha

FONTE: O Autor (2020).

Para realizar a conversão dos valores originais para os valores codificados é possível utilizar a Equação 5.

$$x_c = \frac{x_0 - PC}{\frac{\Delta}{2}} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

x_c é a variável codificada,

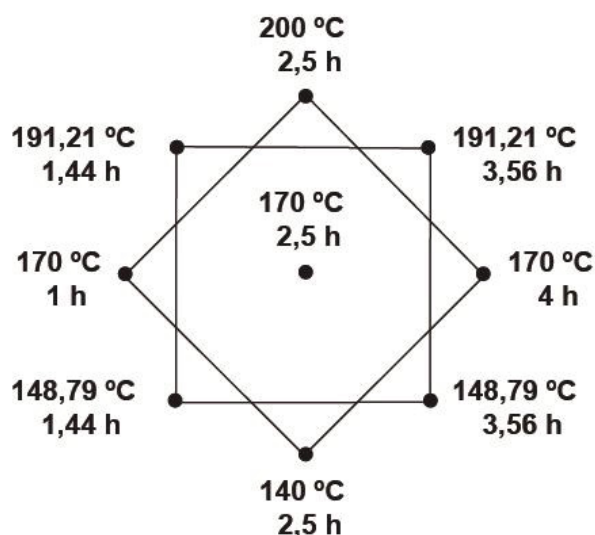
x_0 é a variável original que se deseja codificar,

PC é o ponto central,

Δ é a diferença entre os valores originais dos níveis 1 e -1.

Para facilitar a compreensão da configuração dos experimentos em relação aos fatores e níveis é possível observar a Figura 8 e na Tabela 5.

FIGURA 8 – CONFIGURAÇÃO DE EXPERIMENTOS



FONTE: O autor (2020).

TABELA 5 – NÍVEIS EM CADA CODIFICAÇÃO PARA A TEMPERATURA E O TEMPO

Nível	-1,41	-1	0 (PONTO CENTRAL)	1	1,41
Temperatura (°C)	140	148,79	170	191,21	200
Tempo (h)	1	1,44	2,5	3,56	4

FONTE: O autor (2020).

3.2 MATÉRIA-PRIMA E PREPARO DO MATERIAL

A matéria-prima selecionada para a realização desse experimento foram tábuas comerciais de *Pinus taeda* L., retiradas de fazendas de reflorestamento da empresa Berneck em Curitiba, estado de Santa Catarina. A madeira foi serrada e seca em estufa. Sendo depois classificada de acordo com procedimentos da empresa utilizando a tecnologia microtec e enviada ao laboratório de Tecnologia da Madeira, na Universidade Federal do Paraná, em Curitiba.

Foram selecionadas 30 tábuas comerciais acondicionadas em câmara climática de 3,8x10x400 cm, em espessura, largura e comprimento, respectivamente,

e que tivessem entre cinco e seis anéis de crescimento visíveis no topo. As tábuas foram seccionadas em seis tábuas menores de 60 cm de comprimento, totalizando 180 peças. Visando uma padronização na classe de massa específica das tábuas, todas as peças tiveram suas massas aferidas após ficarem estabilizadas em câmara climática a 65% de umidade relativa do ar e 20 °C. Foi calculada a média aritmética da massa das tábuas e foram selecionadas apenas aquelas que ficaram dentro de um desvio padrão, tanto acima quanto abaixo da média (1391 ± 154 g). Também foi realizado uma classificação visual, com o intuito de retirar as amostras que tivessem nós aparentes e prejudiciais para a modificação térmica e confecção das amostras. Dessa nova classificação, restaram 72 amostras para serem modificadas termicamente, sendo seis em cada tratamento.

3.3 MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA

Após a preparação, as tábuas foram levadas para a realização dos tratamentos térmicos no laboratório de cerâmica no centro politécnico da Universidade Federal do Paraná. O equipamento utilizado para os tratamentos térmicos foi um forno cerâmico da marca Linn Elektro Therm, modelo kk260 com temperatura máxima de até 1340°C. Foram aplicados 11 tratamentos térmicos, seguindo o que foi delineado pelo método DCCR demonstrado na Tabela 4, em bateladas de seis tábuas por tratamento. A Figura 9 apresenta o forno que foi utilizado.

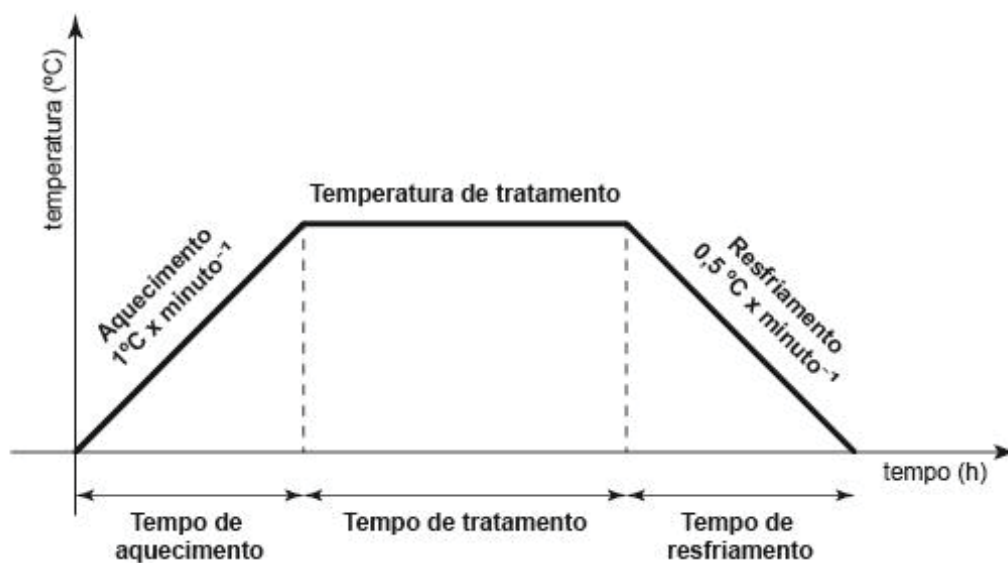
FIGURA 9 – FORNO UTILIZADO PARA A MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA



FONTE: O autor (2020).

Além das temperaturas de modificação térmica, outro fator importante é a rampa de aquecimento e resfriamento. Foi utilizado como rampa de aquecimento $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, como apresentado na Figura 10. As rampas de aquecimento e resfriamento foram baseadas em testes preliminares e em Juizo et al. (2018).

FIGURA 10 – GRÁFICO TEMPERATURA X TEMPO PARA A MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA

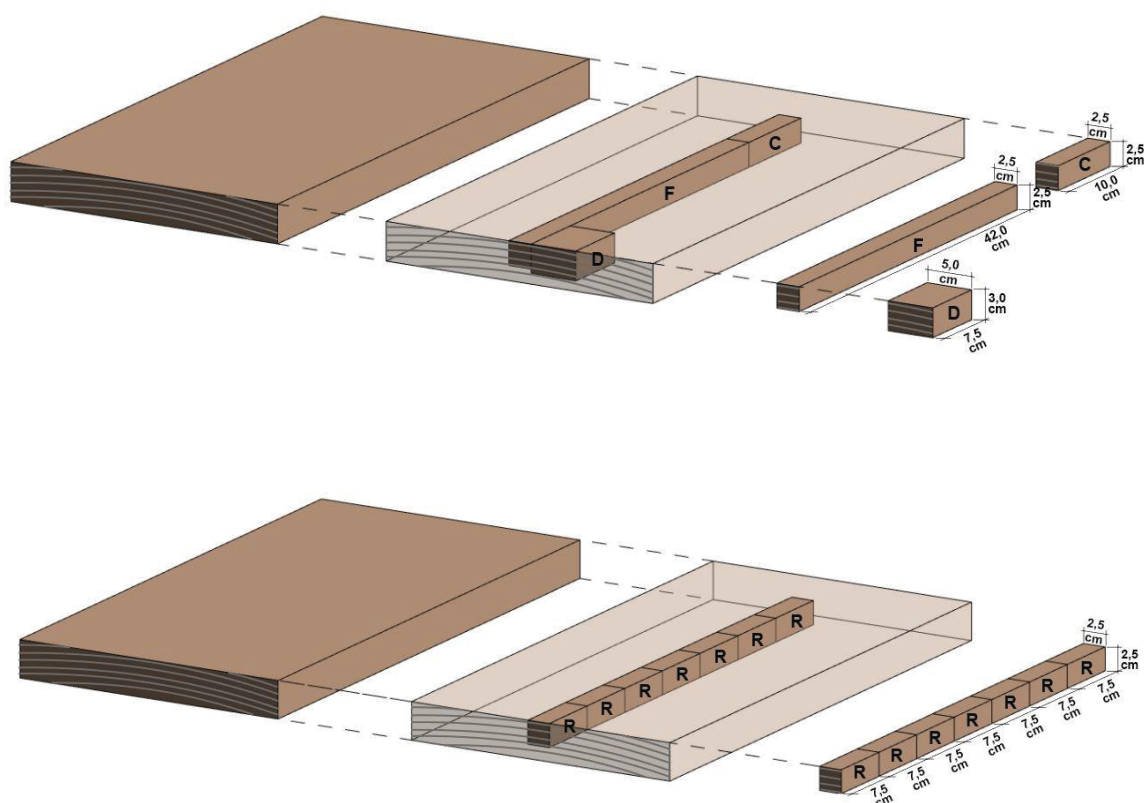


FONTE: O autor (2020).

3.4 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA

Após a realização da modificação térmica as tábuas foram processadas para a confecção dos corpos de prova para os ensaios das propriedades tecnológicas. As propriedades avaliadas foram as seguintes: Propriedades físicas, entre elas, perda de massa, teor de umidade de equilíbrio, massa específica aparente, massa específica aparente básica, massa específica anidra, massa específica saturada, inchamento linear e volumétrico, coeficiente de anisotropia, coeficiente de retratibilidade, molhabilidade, taxa de absorção de água e eficiência anti-inchamento; propriedades mecânicas, entre elas, flexão estática, compressão paralela as fibras e dureza janka; propriedades colorimétricas, seguindo a espectroscopia no visível pelo método CIELAB. A Tabela 6 resume a adaptação da norma ASTM para confecção dos corpos de prova (método secundário preconizado pela norma). A Figura 11 apresenta a confecção e dimensão dos corpos de prova, bem como a Tabela 6 demonstra as normas utilizadas. Foram utilizados 36 corpos de prova por propriedade tecnológica.

FIGURA 11 – PREPARO DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: O autor (2020).

Onde: F - referente a flexão; C – referente a compressão; D – referente a dureza; R – referente as propriedades físicas e colorimétricas.

TABELA 6 – RESUMO DAS NORMAS E PROCEDIMENTOS UTILIZADAS

Propriedade	Largura (cm)	Espessura (cm)	Comprimento (cm)	Norma ou referência
Perda de massa	2,5	2,5	7,5	Cademartori (2012) adaptado
Teor de umidade de equilíbrio	2,5	2,5	7,5	ASTM 143-94 (2000) adaptada
Massa específica aparente básica	2,5	2,5	7,5	ASTM 143-94 (2000) adaptada
Massa específica anidra	2,5	2,5	7,5	ASTM 143-94 (2000) adaptada
Massa específica aparente	2,5	2,5	7,5	ASTM 143-94 (2000) adaptada
Massa específica saturada	2,5	2,5	7,5	ASTM 143-94 (2000) adaptada
Inchamento linear (R,T e L) e volumétrico	2,5	2,5	7,5	ASTM 143-94 (2000) adaptada
	2,5	2,5	7,5	Calonego (2017) adaptado

Coeficiente de Retratabilidade (R, T, L e V)				
Anisotropia de inchamento	2,5	2,5	7,5	Calonego (2017) adaptado
Molhabilidade (R e T)	2,5	2,5	7,5	Cademartori (2012) adaptado
Taxa de absorção	2,5	2,5	7,5	Cademartori (2012) adaptado
Flexão estática (R)	2,5	2,5	42	ASTM 143-94 (2000) adaptada
Compressão paralela as fibras	2,5	2,5	10	ASTM 143-94 (2000) adaptada
Dureza Janka (T)	3	5	7,5	ASTM 143-94 (2000) adaptada
Colorimetria (a*,b*, L*, C, h e ΔE)	2,5	2,5	7,5	CIELAB

FONTE: O Autor (2020).

3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS

3.5.1 Perda de massa

A perda de massa foi calculada a partir da variação entre os valores de massa do material antes e depois dos tratamentos aplicados, assim como utilizado por Cademartori (2012) e Batista (2012). A Equação 6 demonstra como foi realizado o cálculo. Para o aferimento da massa utilizou-se uma balança analítica com precisão de 0,01g.

$$PM = \frac{(Ma - Mt)}{Ma} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

PM= perda de massa (%),

Ma= massa dos corpos de prova em equilíbrio antes da modificação térmica (g),

Mt= massa dos corpos de prova depois da modificação térmica (g).

3.5.2 Teor de umidade de equilíbrio higroscópico e taxa de absorção de água

Seguindo a metodologia que foi adotada por Cademartori (2012), para a determinação do teor de equilíbrio higroscópico e estabilidade dimensional, após os tratamentos, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climática ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\pm 5\%$) até a obtenção de massa constante (24h sem uma variação de 0,5% da massa). As mensurações de massa dos corpos de prova em intervalos de 24h foram realizadas com o auxílio de uma balança analítica com precisão de 0,01g.

A estabilidade dimensional foi avaliada por meio da mensuração das variáveis taxa de absorção de água, inchamento linear (radial, tangencial e longitudinal), inchamento volumétrico, coeficiente de anisotropia de inchamento, coeficiente de retratibilidade (radial, tangencial e longitudinal), molhabilidade (radial e tangencial) e eficiência anti-inchamento. A taxa de absorção de água foi realizada utilizando os corpos de prova do teor de umidade de equilíbrio hidrosópico que estavam acondicionados em câmara climática e submergindo-os por 24 horas. Depois as mesmas amostras foram secas em uma estufa com ventilação forçada a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até a estabilização da massa. Para o cálculo da taxa de absorção de água foi utilizada a Equação 7.

$$Tab = \frac{(M_{24h} - Ms)}{Ms} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

Tab= taxa de absorção de água (%),

M_{24h} = massa dos corpos de prova submersos por 24 horas (g),

M_s = massa dos corpos de prova secos (g).

3.5.3 Inchamento linear e inchamento volumétrico

Para a medição do inchamento linear e volumétrico, as medidas dos planos radial, tangencial e longitudinal foram avaliados após a saturação em água e secagem das amostras e calculados de acordo com as Equações 8 e 9.

$$IL = \frac{(lv - ls)}{ls} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

$$IV = \frac{(V_v - V_s)}{V_s} \times 100 \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

IL ou IV= Inchamento linear ou volumétrico (%),

lv ou Vv = Medida linear (radial, tangencial ou longitudinal) ou volumétrica saturada,

ls ou Vs = Medida linear (radial, tangencial ou longitudinal) ou volumétrica seca.

3.5.4 Anisotropia de inchamento e coeficiente de retratibilidade

Para o cálculo da anisotropia de inchamento, foi calculado a razão entre o inchamento linear tangencial e radial utilizando a Equação 10.

$$A_i = \frac{IT}{IR} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

A_i = Anisotropia de inchamento

IT= inchamento tangencial máximo (%)

IR= inchamento radial máximo (%)

Para o cálculo do coeficiente de retratibilidade que é a razão entre a variação linear ou volumétrica pela variação mássica de uma amostra, foram utilizadas as Equações 11 e 12.

$$Q = \frac{\Delta\alpha}{\Delta u} \quad \text{Equação 11}$$

$$Q = \frac{(L_{12\%} - L_{0\%}) \times M_{0\%}}{(L_{0\%} \times (M_{12\%} - M_{0\%}))} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

Q = Coeficiente de retratibilidade

$\Delta\alpha$ = variação de inchamento (%)

Δu = variação de umidade (%)

$L_{12\%}$ = Dimensão a 12% de umidade (cm)

$L_{0\%}$ = Dimensão a 0% de umidade (cm)

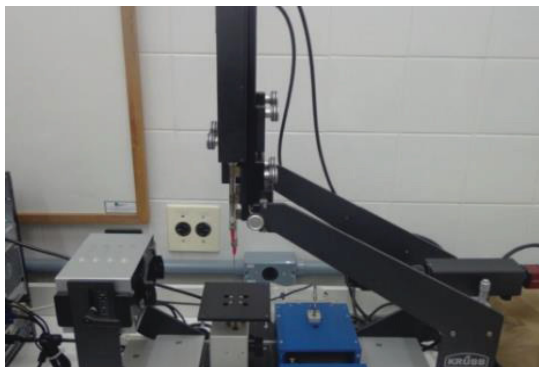
$M_{12\%}$ = Massa a 12% de umidade (g)

$M_{0\%}$ = Massa a 10% de umidade (g)

3.5.5 Molhabilidade e ângulo de gota

A determinação do ângulo de contato foi realizada em goniômetro Krüss, modelo *Drop Shape Analysis* (DAS) pertencente ao Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. Os ensaios foram realizados por meio do método de gota séssil, ou seja, a partir da deposição de uma gotícula de água deionizada de 5 μ l sobre três pontos distintos da superfície (radial e tangencial) de uma mesma peça, usando para o cálculo o método de young-Laplace. A Figura 12 demonstra o equipamento utilizado.

FIGURA 12 - GONIÔMETRO KRÜSS, MODELO DROP SHAPE ANALYSIS (DAS)



FONTE: O autor (2020).

3.5.6 Massa específica

Para efeito de comparação da massa específica entre tratamentos, e para averiguar o efeito da umidade na massa específica da madeira foram determinados quatro tipos de massa específica: massa específica aparente (0% ou anidra, condições normalizadas para 12% de teor de umidade de equilíbrio e saturada) e massa específica aparente básica. O procedimento foi realizado com a adaptação da norma da *American Society for Testing and Materials* D143-94 (ASTM, 2000), conforme descrito na tabela 6. Para tal, utilizou-se uma balança analítica com precisão

de 0,01g e um paquímetro digital com precisão de 0,001mm. As Equações 13 e 14 foram utilizadas para realização dos cálculos.

$$Me_{ap} (0\%,12\% \text{ e saturada}) = \frac{M_{ap}}{V_{ap}} \quad \text{Equação 13}$$

$$Me_b = \frac{M_{0\%}}{V_s} \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

Me_{ap} = massa específica aparente a 0% ou anidra, condições normalizadas para 12% de teor de umidade de equilíbrio, ou seja, $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar e $20\pm 2^\circ\text{C}$ e saturada (g/cm^3)

Me_b = massa específica básica (g/cm^3),

$M_{0\%}$ = massa seca dos corpos de prova (g),

M_s = massa saturada dos corpos de prova (g),

V_s = volume saturado dos corpos de prova (cm^3),

$V_{0\%}$ = volume dos corpos de prova a 0% de umidade (cm^3),

$M_{12\%}$ = Massa aparente do corpo de prova (g),

$V_{12\%}$ = Volume aparente do corpo de prova (cm^3).

Para a medição do volume e massa saturada as amostras foram imersas em água até a estabilização (24h horas sem a massa variar mais de 0,5% em relação a massa anterior). Para a medição da massa e do volume anidrido as amostras foram secas em uma estufa com ventilação forçada a $103\pm 2^\circ\text{C}$ até a estabilização.

3.5.7 Propriedades mecânicas

Para a realização dos ensaios mecânicos optou-se por utilizar flexão estática (flexão perpendicular às fibras), compressão paralela as fibras e dureza janka, baseadas na norma ASTM 143-94 (2000) adaptada, como exposto na Tabela 6. Os ensaios foram realizados em Máquina Universal de Ensaio (EMIC – DL 30.000) situada no laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Paraná.

A partir disso foi possível obter-se as propriedades de rigidez (módulo de elasticidade e módulo de ruptura). A Figura 13 demonstra a realização dos ensaios.

FIGURA 13 – ENSAIOS MECÂNICOS DE FLEXÃO ESTÁTICA, COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS E DUREZA JANKA



FONTE: O autor (2020).

3.5.8 Propriedades colorimétricas

A avaliação colorimétrica foi realizada com espectrofotômetro Konica Minolta CM-5, com faixa espectral de 360 a 750 nm, fonte de luz D65 e ângulo de observação de 10° (padrão CIELAB). Foram realizadas duas medições por face (radial, tangencial e transversal), totalizando 12 medições por amostra, das quais foram obtidas a luminosidade (L^*), a coordenada cromática verde-vermelha (a^*) e a coordenada cromática azul-amarela (b^*). Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e análise de regressão. O croma (C) e o ângulo de matiz (h^*) foram calculados pelas Equação 15, 16 e 17. A Figura 14 demonstra como são dimensionadas as coordenadas para referência das cores medidas. A Figura 15 demonstra a coleta de dados.

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{Equação 15}$$

$$h^* = \arctang\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{Equação 16}$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

Equação 17

Onde:

ΔE = diferença de coloração dos corpos de prova,

ΔL^* , Δa^* e Δb^* = variação dos parâmetros de claridade, coordenada cromática vermelho-verde e coordenada cromática amarelo-azul entre os corpos de prova de referência e modificados termicamente

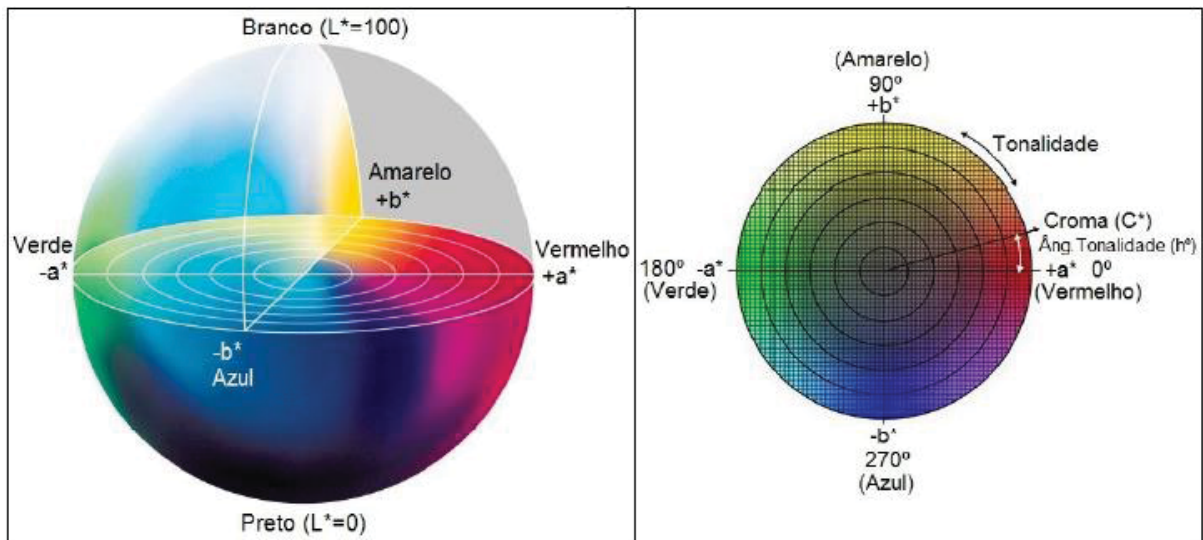
C = saturação de cor

h^* = ângulo de tinta

a^* = coordenada cromática vermelho (+) – verde (-)

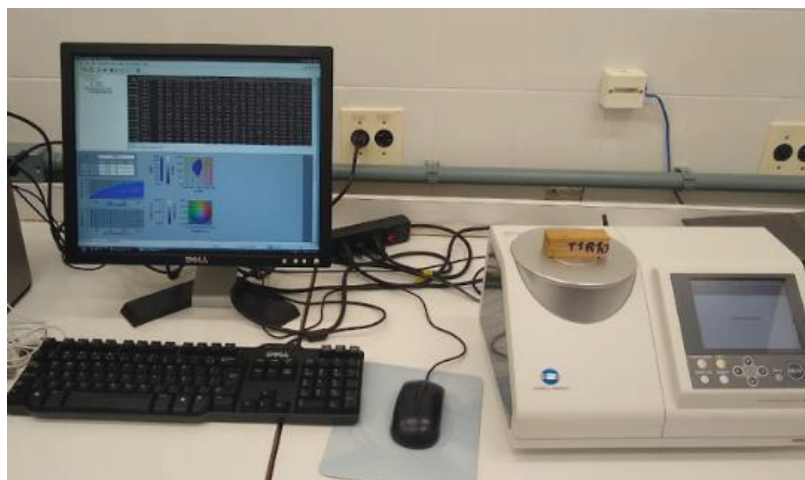
b^* = coordenada cromática amarelo (+) – azul (-)

FIGURA 14 – DIAGRAMA COLORIMÉTRICO PELO SISTEMA CIE L*A*B



FONTE: Adaptado de ASTM E-308 (1999); Gonzalez et al. (2001); Bekhta e Nienz (2003); Brainard (2003); apud Calonego (2017).

FIGURA 15 – COLETA DE DADOS COLORIMÉTRICOS



FONTE: O autor (2020).

3.6 CONSTRUÇÃO DO MODELO COM BASE NO PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL

Como se desconhecia a relação entre a variável resposta e os fatores do processo, a Equação 18 de segunda ordem foi utilizada a fim de representar, de forma aproximada, o relacionamento entre as variáveis do experimento. Foi considerado para os cálculos desses modelos a metodologia proposta por Barros Neto, Scarmínio e Bruns (2010); Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009) e Pereira Filho (2017).

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 T_1 + \beta_2 t_2 + \beta_{11} T_1^2 + \beta_{22} t_2^2 + \beta_{12} T_1 t_2 + \varepsilon \quad \text{Equação 18}$$

O objetivo da regressão foi encontrar os coeficientes β para que fosse possível prever os resultados. β_0 representa o coeficiente constante; $\beta_1 T_1$ está relacionado a temperatura e seu coeficiente linear; $\beta_2 t_2$ está relacionado ao tempo e seu coeficiente linear; $\beta_{11} T_1^2$ está relacionado ao coeficiente quadrático da temperatura; $\beta_{22} t_2^2$ está relacionado ao coeficiente quadrático do tempo; $\beta_{12} T_1 t_2$ está relacionado a interação de segunda ordem entre o tempo e a temperatura e por fim o ε é o erro embutido ao modelo. É aconselhável para os valores de T_1 e t_2 usar os valores codificados para que não haja diferença em ordem de grandeza entre os fatores, valores esse já calculados na Tabela 4. Para calcular os coeficientes foi utilizado a Equação 19.

$$b = (X^tX)^{-1}X^ty$$

Equação 19

Em que b é o vetor de coeficiente, X é a matriz de 11 experimentos por 6 coeficientes e y é o vetor de resultados obtidos experimentalmente. Para exemplificar, o coeficiente b_{11} por exemplo, é a multiplicação do b_1 pelo b_1 . A matriz pode ser observada na Tabela 7:

TABELA 7 – MATRIZ BÁSICA PARA O CÁLCULO DOS MODELOS DE REGRESSÃO QUADRÁTICOS CODIFICADOS

b0	b1	b2	b11	b22	b12
1	-1	-1	1	1	1
1	1	-1	1	1	-1
1	-1	1	1	1	-1
1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	-1,41	0	2	0	0
1	0	-1,41	0	2	0
1	1,41	0	2	0	0
1	0	1,41	0	2	0

FONTE: O autor (2020).

Efetuada os cálculos matriciais e encontrado os valores dos coeficientes do vetor b foi possível gerar o modelo estatístico. Neste momento é importante averiguar se todos os coeficientes calculados são significativos ou não, para isso, num primeiro momento deve-se calcular os valores previstos para poder compará-los aos valores experimentais. A Equação 20 demonstra como esse cálculo pode ser feito, onde \hat{Y} são os valores previsto, a Tabela 7 é a matriz de experimentos e b é o vetor de coeficientes encontrados.

$$\hat{Y} = Xb$$

Equação 20

Gerado o modelo e calculado os valores previstos foi possível construir uma tabela de análise de variância (ANOVA). Foram realizados os testes de Shapiro-Wilk e verificação da assimetria (*skewness*) e curtose (*kurtosis*) para averiguação da normalidade dos dados e o teste de Levene para validação da homogeneidade de variâncias. As análises de normalidade e homogeneidade estão dispostas no apêndice 1 e foram realizadas no software estatístico *Statgraphics 18®*.

Normalmente em alguns tipos de regressão, a tabela de ANOVA é colocada em segundo plano, entretanto, para o DCCR e MSR uma análise criteriosa de cada parâmetro e coeficiente é necessário para que haja uma validação consistente do modelo. Para facilitar o entendimento, as tabelas completas de ANOVA foram colocadas no apêndice 3, e no corpo de texto foram colocadas tabelas simplificadas de análise de variância. Nela são relacionados diversos parâmetros do modelo proposto como: Soma quadrática da Regressão ou SQR, que neste caso é calculado o somatório quadrado da diferença entre os valores previstos e a média das respostas obtidas experimentalmente, sendo que os graus liberdade considerados devem ser a subtração do número de coeficientes calculados menos um ($p-1$).

Soma quadrática dos resíduos ou SQres, que é o somatório dos quadrados das diferenças entre os valores experimentais e os previstos, deve considerar a informação que o modelo não foi capaz de prever adequadamente, sendo assim, os graus de liberdade da SQres é a subtração do número de experimentos (11) e o número de coeficientes. A soma quadrática total é a soma de SQR e SQres.

Outro parâmetro importante a ser considerado é a magnitude do erro puro ou SQep, que é estimada utilizando o quadrado da diferença entre a média das respostas no ponto central e as respostas obtidas nesses experimentos nos próprios pontos centrais. Por fim, com a subtração entre SQres e SQep, é possível demonstrar a incapacidade do modelo em se ajustar aos pontos experimentais obtidos. Esse último parâmetro é chamado de soma quadrática da falta de ajuste SQfaj, em que o número de graus de liberdade será o número de experimentos distintos (desconsidera as repetições nos pontos centrais) menos o número de coeficientes.

Para cada soma quadrática está associado um número de graus de liberdade, e quando se realiza a divisão da primeira pela segunda, obtém-se a média quadrática (MQ) para cada parâmetro. Esses valores de MQ podem ser utilizados para a verificação da qualidade do modelo por meio do teste F. No teste F dos resíduos e da regressão o valor do Fcalculado (F_{cal1}) deve ser maior que o Ftabelado para o modelo

ser considerado confiável. Em contrapartida, quando é considerado o erro puro e a falta de ajuste o Fcalculado (Fcal2) deve ser menor que o Ftabelado para demonstrar que não há falta de ajuste no modelo. As Equação 21 e Equação 22 foram utilizadas para calcular os valores de F. É importante ressaltar que todos as análises foram realizadas com 95% de confiança estatística.

$$F_{cal1} = \frac{\frac{SQR}{p-1}}{\frac{SQres}{n-p}} = \frac{MQR}{MQres} \quad \text{Equação 21}$$

$$F_{cal2} = \frac{\frac{SQfaj}{m-p}}{\frac{SQep}{n-m}} = \frac{MQfaj}{MQep} \quad \text{Equação 22}$$

O valor de R^2 (variação explicada) pode ser cálculo através de uma razão entre SQR e SQT e o valor de R pode ser extraído pela raiz quadrada do valor encontrado em R^2 . A tabela 8 resume os parâmetros de soma quadrática da ANOVA.

TABELA 8 – PARÂMETROS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Parâmetro	SQ	GI	MQ	Fcalculado	Ftabelado	Razão F
SQR	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	p-1	$\frac{SQR}{GL}$	$\frac{MSQR}{MQres}$	(α ; GISQR, GISQres)	$\frac{F_{cal1}}{F_{tab}}$
SQres	$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	n-p	$\frac{SQres}{GL}$	-	-	-
SQT	SQR+SQres	n-1	$\frac{SQT}{GL}$	-	-	-
SQep	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	n-m	$\frac{SQep}{GL}$	$\frac{MSfat}{MQep}$	(α ; GISQfat, GISQep)	$\frac{F_{tab}}{F_{cal2}}$
SQfaj	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	m-p	$\frac{SQfat}{GL}$	-	-	-
R^2	$\frac{SQR}{SQT}$	R	$\sqrt{R^2}$	p-valor	-	-

FONTE: O autor (2020).

Onde:

SQR = Soma quadrática da regressão;
 SQres = Soma quadrática dos resíduos;
 SQT = Soma quadrática total;
 SQep = Soma quadrática erro puro;
 SQfat = Soma quadrática da falta de ajuste;
 GI = Graus de liberdade;
 R^2 = Variação explicada;
 α = Nível de significância (0,05 para 95%);
 \hat{y}_i = Resposta prevista;
 \bar{y} = Média das respostas experimentais;
 p = Número de coeficientes;
 n = Número de experimentos;
 m = Número de experimentos independentes;
 y_i = Resposta em cada experimento;

Para melhorar e facilitar a apresentação de dados, a tabela de anova foi simplificada, visando destacar os parâmetros principais para validação dos modelos. A Tabela 9 apresenta a anova simplificada.

TABELA 9 – PARÂMETROS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA SIMPLIFICADOS

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Razão F
Propriedades tecnológicas testadas	F	$\frac{MSQR}{MQres}$	(α ; GISQR, GISQres)	$\frac{Fcal}{Ftab}$
	F_{SQe}	$\frac{MSfat}{MQep}$	(α ; GISQfat, GISQep)	$\frac{Ftab}{Fcal}$
	p-valor		R^2	$\frac{SQR}{SQT}$

FONTE: O autor (2020).

Quando concluída a análise do modelo e não há falta de ajuste, torna-se possível verificar se todos os coeficientes são realmente necessários. Para isso, multiplicasse o MQres pela diagonal principal da matriz $(X^tX)^{-1}$. Obtendo assim as variâncias. Multiplicando a raiz quadrada das variâncias pelo valor de t com um grau de liberdade a menos que MQres e 95% de confiança é possível obter o erro em torno dos coeficientes. Se o valor dos coeficientes \pm o erro encontrado atingir o valor de 0 (zero), o coeficiente pode ser considerado insignificante para o modelo.

Realizou-se também a análise dos efeitos de cada variável e suas interações através do teste t e do p-valor com 95% de confiança estatística. Quando o efeito de alguma variável demonstrou ser não significativo estatisticamente, o modelo foi recalculado utilizando apenas os coeficientes significativos. Como análise complementar, os gráficos dos valores observados x os previstos estão no Apêndice 2. Os modelos recalculados foram colocados no Apêndice e 4.

3.7 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CÁLCULO DOS PONTOS CRÍTICOS

Com o modelo gerado finalizado, é possível criar gráficos de superfície de resposta, bem como, curvas de nível para a visualização dos pontos ótimos. As curvas de nível e os gráficos foram gerados no software excel utilizando as respostas dos modelos para cada temperatura e tempo, em valores inteiros que variam em 1°C e 0,1 hora. Quando há um ponto de máximo ou mínimo no gráfico é possível encontrar os valores críticos (otimizados). Para isso, aplica-se a derivada parcial de primeira ordem para o tempo e temperatura e é igualado a zero. As Equação 23 e Equação 24 demonstram os cálculos.

$$\frac{d\hat{y}}{dT_1} = 0 \quad \text{Equação 23}$$

$$\frac{d\hat{y}}{dt_2} = 0 \quad \text{Equação 24}$$

Em que:

$d\hat{y}/dT_1$ é a derivada do modelo gerado em relação a variável T_1 (temperatura),

$d\hat{y}/dt_2$ é a derivada do modelo gerado em relação a variável t_2 (tempo).

Dessa forma, é possível encontrar os valores otimizados em determinado tempo e temperatura para cada uma das propriedades tecnológicas da madeira de pinus modificada termicamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados para as seguintes propriedades: propriedades físicas (perda de massa, teor de umidade de equilíbrio, inchamento linear e volumétrico, coeficiente de retratibilidade, anisotropia de inchamento, taxa de absorção de água e eficiência anti-inchamento, molhabilidade, massa específica aparente, massa específica básica, massa específica aparente anidra, saturada e a 12%); propriedades mecânicas (flexão perpendicular as fibras, compressão paralela as fibras e dureza janka) e propriedades colorimétricas (CIELAB).

Para cada uma das propriedades foram apresentadas as tabelas com os resultados experimentais e previstos, tabelas de ANOVA resumida ou simplificada, quando significativo estatisticamente foi gerada uma tabela com os coeficientes da regressão, o modelo quadrático gerado, o gráfico tridimensional, o gráfico de superfície de resposta, quando houve um ponto crítico (máximo ou mínimo) foram calculadas as derivadas parciais para otimização e por fim, quando o modelo foi significativo, mas houveram coeficientes não significativos, o modelo e as tabelas foram recalculadas e realocados para o Apêndice 4.

Na maior parte dos trabalhos de planejamento experimental as tabelas de ANOVA e as tabelas dos coeficientes são apresentadas nos apêndices, contudo, para um melhor entendimento, discussão dos resultados e para a validação de modelos criados a partir do DCCR e MSR é indicado que as tabelas sejam expostas no corpo de texto, mesmo que de forma repetitiva, criando uma rotina replicável para quem for utilizá-los posteriormente.

4.1 PERDA DE MASSA E TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

A Tabela 10 apresenta os resultados experimentais e previstos pelo modelo para a perda de massa e para o teor de umidade de equilíbrio com o ambiente.

TABELA 10 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS DE PERDA DE MASSA E PARA O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO COM O AMBIENTE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamentos	T	t	PM	\widehat{PM}	Tue	\widehat{Tue}
	(°C)	(h)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	148,79	1,44	3,31	4,07	11,62	11,53
2	191,21	1,44	10,97	10,47	7,46	7,99

3	148,79	3,56	4,22	4,71	11,48	11,4
4	191,21	3,56	11,98	11,20	7,23	7,76
5	170	2,5	6,99	7,52	10,11	10,42
6	170	2,5	7,61	7,52	11,09	10,42
7	170	2,5	7,94	7,52	10,08	10,42
8	140	2,5	3,97	3,08	11,59	11,81
9	170	1	7,29	7,10	10,42	10,2
10	200	2,5	11,29	12,20	7,38	6,73
11	170	4	7,87	8,07	10,16	9,94
Testemunha	-	-	0,00	-	12,88	-

FONTE: O autor (2020).

Onde:

T = temperatura (°C)

t = tempo (H)

PM = Perda de massa (%)

Tue = Teor de umidade de equilíbrio (%)

^ = variáveis com o acento circunflexo são as previstas pelo modelo,

Níveis para a temperatura = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (140; 148,79; 170; 191,21;200) °C,

Níveis para o tempo = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (1; 1,44; 2,5; 3,56; 4) horas.

Observa-se na Tabela 10, que os tratamentos com maiores temperaturas (T2, T4 e T10) causaram maior pontos percentuais de perda de massa da madeira. Essa mesma tendência foi observada por alguns autores que trabalharam com modificação térmica de espécies do gênero pinus como: Pincelli et al. (2002), Modes (2010), Silva (2012), Bellon (2013), Poubel et al. (2015), Távora (2019), Schulz et al. (2020) e autores que trabalharam com outros gêneros como: Calonego (2009), Batista (2012), Cademartori (2012) e Calonego (2017).

Sundqvist (2004) afirma que em temperaturas acima de 150°C ocorre a degradação, mesmo que pequena de todos os elementos químicos da madeira, sendo que quanto maior a temperatura, maior a degradação. Esteves e Pereira (2009) descrevem que no início da modificação térmica, os extrativos volatizam ou degradam, fator predominante para a perda de massa na madeira modificada termicamente. Com a degradação da lignina, celulose, hemicelulose e extrativos, ocorre um rearranjo estrutural na madeira, formam novas substâncias consideradas extraíveis, o que pode

contribuir para diminuição mássica (MILITZ; TJEERDSMA, 2001; MARTON et al., 2003; TJEERDSMA; MILITZ, 2005; HAKKOU et al. (2005); BOONSTRA; TJEERSDMA, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009). Segundo Esteves et al. (2008), o processo Thermowood da Finlândia recomenda ao menos 3% de perda de massa para que haja uma melhora na estabilidade dimensional da madeira.

É possível observar na Tabela 10, que os tratamentos com maiores temperaturas causaram uma tendência de diminuição no teor de umidade de equilíbrio com o ambiente. Essa mesma tendência foi observada por alguns autores que trabalharam com modificação térmica de espécies do gênero pinus como: Esteves et al. (2008), Ates, Akyildiz e Ozdemir (2009), Modes (2010), Lengowski (2011), Bellon (2013), Poubel et al (2015), Távora (2019) e autores que trabalharam com outros gêneros como: Aydemir (2007), Calonego (2009), Todaro et al. (2012), Batista (2012), Cademartori (2012), Cademartori et al. (2015) e Calonego (2017).

Esse fato pode ser explicado, pois com a degradação dos polissacarídeos e da lignina é formado um novo complexo polimérico, e com isso ocorre uma menor quantidade de sítios de adsorção de água, ou grupos hidroxílicos (OH) disponíveis para reagirem com a água, tornando a madeira mais hidrofóbica e mais estável higroscopicamente (MILITZ; TJEERDSMA, 2001; MARTON et al., 2003; TJEERDSMA; MILITZ, 2005; HAKKOU et al. (2005); BOONSTRA; TJEERSDMA, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009). Esteves et al. (2007) e Cademartori et al. (2015) afirmam que há uma relação inversamente proporcional entre a perda de massa e ao teor de umidade de equilíbrio, o que também ocorreu neste estudo. Com os dados experimentais coletados foi possível fazer uma análise de regressão e os parâmetros da ANOVA estão dispostos na Tabela 11.

TABELA 11 –ANOVA SIMPLIFICADA PARA PERDA DE MASSA E TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab
PM	FSQR	21,96729	5,050329	4,349674
	FSQep	4,811676	19,16429	0,251075
	p-valor	0,0021*	R ²	0,95645981
TUE	FSQR	15,25021	5,050329	3,019647
	FSQep	1,145981	19,16429	0,059798
	p-valor	0,0048*	R ²	0,938462

FONTE: O autor (2020).

Onde:

PM= perda de massa (%)

TUe = Teor de umidade de equilíbrio (%)

FSQR = valor de F para soma quadrática da regressão

FSQep = valor de F soma quadrática erro puro

R² = variação explicada

p-valor = para 95% de intervalo de confiança

A Tabela 11 de ANOVA demonstra que o Fcalculado da regressão foi maior que o Ftabelado, bem como, o Fcalculado do erro puro foi menor que o Ftabelado em ambos os casos. Isso indica que os modelos têm uma regressão significativa e que não há falta de ajuste. O valor de R² indica que aproximadamente 96% e 94% da variância pode ser explicada pelo modelo, respectivamente.

Dessa forma, um modelo quadrático significativo pode ser gerado a partir desses parâmetros, o que é corroborado pelo valor do p-valor abaixo de 0,05. A Tabela 12 demonstra os coeficientes do modelo para perda de massa e a Tabela 13 os coeficientes para o teor de umidade de equilíbrio higroscópico.

TABELA 12 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE PERDA DE MASSA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Coeficiente	Estimativa	Erro	Teste t	P-Valor
b0	7,51333	0,505135	14,8739	0*
b1	3,22151	0,309331	10,4144	0,0001*
b2	0,34253	0,309331	1,10733	0,3186
b11	0,0620833	0,368177	0,168623	0,8727
b22	0,0370833	0,368177	0,100721	0,9237
b12	0,025	0,43746	0,0571481	0,9566

FONTE: O autor (2020).

TABELA 13 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Coeficiente	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	10,4242	0,348418	29,9187	0*
b1	-1,79618	0,213361	-8,4185	0,0004*
b2	-0,09281	0,213361	-0,434994	0,6817
b11	-0,57816	0,253951	-2,27666	0,0718
b22	-0,17641	0,253951	-0,69467	0,5182

b12	-0,025	0,301739	-0,0828677	0,9372
-----	--------	----------	------------	--------

FONTE: O autor (2020).

Onde:

b0 = constante,

b1 = coeficiente linear de temperatura,

b2 = coeficiente linear de tempo,

b11 = coeficiente quadrático de temperatura,

b22 = coeficiente quadrático de tempo,

b12 = coeficiente de interação entre tempo e temperatura,

* = significativo em um intervalo de 95% de confiança.

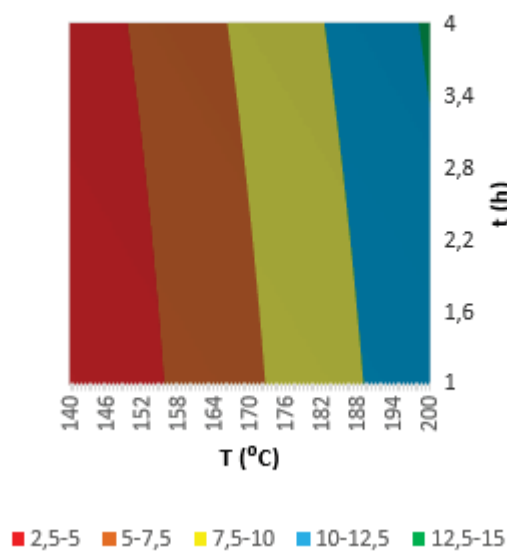
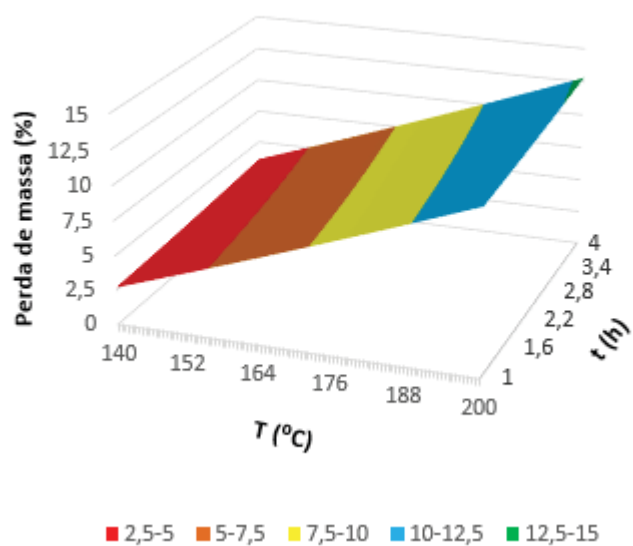
As Tabelas 12 e 13 demonstram que em ambos os experimentos apenas os coeficientes b0 e b1 foram significativos estatisticamente. Nesses casos, o que pode ser discutido é que para esse tipo de modelo a temperatura teve maior influência na perda de massa e no teor de umidade de equilíbrio que o tempo e que o coeficiente linear de temperatura pode ser o suficiente para uma predição dessas propriedades. Também é admissível afirmar que não houve interação entre a temperatura e o tempo, fato esse que pode representar que uma hora foi o suficiente para realizar a modificação térmica. Essa maior influência da temperatura também foi detectada em um estudo realizado por Batista et al. (2011). A Equação 25 e 26 demonstram os modelos quadráticos que foram gerados.

$$\widehat{PM} = (7,5133) + (3,2215)T_1 + (0,3425)t_2 + (0,0621)T_1^2 + (0,0370)t_2^2 + (0,025)T_1t_2 \quad \text{Equação 25}$$

$$\widehat{Tue} = (10,4242) - (1,7962)T_1 - (0,0928)t_2 - (0,5782)T_1^2 - (0,1764)t_2^2 - (0,025)T_1t_2 \quad \text{Equação 26}$$

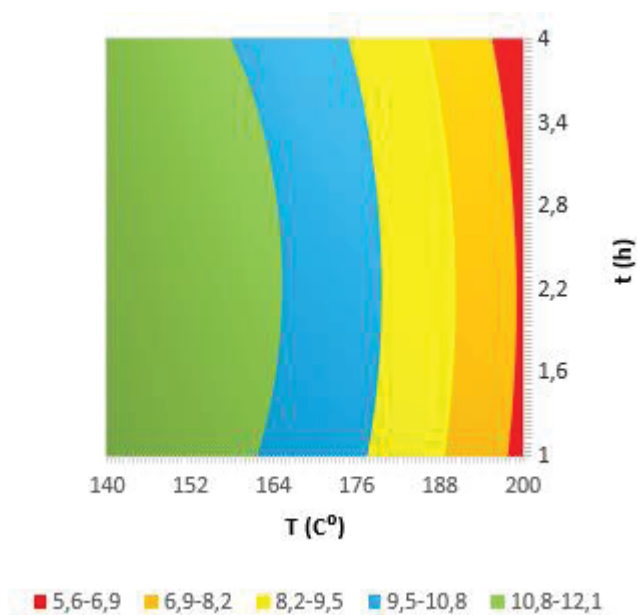
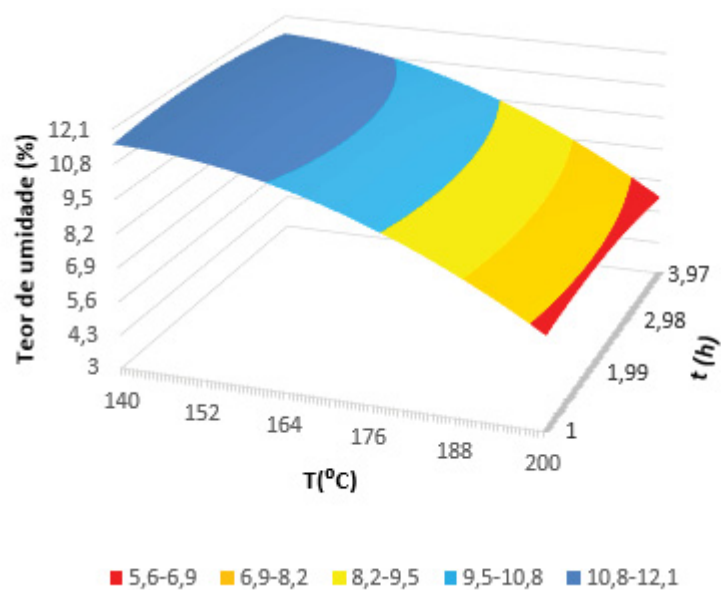
Com os modelos quadráticos significativos gerados para a perda de massa e teor de umidade de equilíbrio ambiente foram criados os gráficos de metodologia de superfície de resposta e as curvas de nível para facilitar a visualização com comportamento da equação (Figuras 16 e 17).

FIGURA 16 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A PERDA DE MASSA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 17 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVAS DE NÍVEL PARA O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

As Figuras 16 e 17 representam o aumento de perda de massa e diminuição do teor de umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura, quando comparadas às amostras testemunha. Também é possível observar uma leve tendência a esquerda da influência do tempo de exposição para o aumento da porcentagem de perda de massa. As Figuras 16 e 17 demonstram que próximo a 200°C e 4 horas de exposição a perda de massa atinge o pico da previsão e o teor de umidade de equilíbrio atinge seu valor mínimo.

A análise de perda de massa tem uma grande importância para modificação térmica, pois além de influenciar no rendimento mássico, no planejamento logístico de uma possível comercialização do material, ela é responsável por ajudar a explicar algumas propriedades físicas de estabilidade dimensional e propriedades mecânicas, as quais tem relevância para esse estudo. Como não há um ponto de máximo ou mínimo visto graficamente, não é indicado calcular um ponto ótimo (ponto crítico).

Vale ressaltar que o teor de umidade de equilíbrio é importante quando se pensa na destinação final do material, bem como, e para qual ambiente será destinado. O teor de umidade de equilíbrio também impacta na estabilidade dimensional da madeira, onde menores valores resultam em diminuição na variação dimensional (GALVÃO; JANKOWSKI, 1985; HILL, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Considerando apenas os coeficientes significativos é possível recalculer o modelo de perda de massa e de teor de umidade de equilíbrio. Os modelos recalculados estão disponíveis no Apêndice 4.

4.2 INCHAMENTO LINEAR E VOLUMÉTRICO

A Tabela 14 apresenta os resultados experimentais e previstos pelo modelo para a taxa de absorção de água.

TABELA 14 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA INCHAMENTO LINEAR E INCHAMENTO VOLUMÉTRICO DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	IR	IR̂	IT	IT̂	IL	IL̂	IV	IV̂
	(°C)	(H)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	148,79	1,44	6,41	6,25	8,96	9,08	0,09	0,09	12,52	12,36
2	191,21	1,44	3,30	3,89	5,29	5,82	0,26	0,17	7,83	8,34
3	148,79	3,56	5,72	5,48	7,55	7,59	0,00	0,07	11,97	11,84
4	191,21	3,56	2,77	3,28	4,85	5,28	0,19	0,16	7,12	7,66
5	170	2,5	4,99	4,90	6,93	6,73	0,17	0,11	10,33	10,27
6	170	2,5	4,88	4,90	6,64	6,73	0,03	0,11	10,30	10,27
7	170	2,5	4,83	4,90	6,62	6,73	0,14	0,11	10,16	10,27
8	140	2,5	6,09	6,46	8,76	8,76	0,05	-0,01	12,48	12,76
9	170	1	5,32	5,09	8,15	7,81	0,13	0,19	10,83	10,67
10	200	2,5	3,93	3,23	5,40	4,83	0,04	0,12	7,63	6,96
11	170	4	4,23	4,11	6,58	6,37	0,21	0,18	10,03	9,82
Testemunha	-	-	6,43	-	9,43	-	0,21	-	15,09	-

FONTE: O autor (2020).

Onde:

T = temperatura (°C)

t = tempo (H)

IR = Inchamento radial máximo (%)

IT = Inchamento tangencial máximo (%)

IL = Inchamento longitudinal máximo (%)

IV = Inchamento volumétrico máximo (%)

^ = variáveis com o acento circunflexo são as previstas pelo modelo,

Níveis para a temperatura = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (140; 148,79; 170; 191,21; 200) °C,

Níveis para o tempo = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (1; 1,44; 2,5; 3,56; 4) horas.

É possível observar na Tabela 14, que os tratamentos com maior temperatura (T2, T4 e T10) causaram uma tendência de diminuição na porcentagem de inchamento linear radial e inchamento linear tangencial. Essa mesma tendência foi observada por alguns autores que trabalharam com modificação térmica de espécies do gênero pinus como: Militz e Tjeerdsma (2001); Ates et al. (2009); Esteves e Pereira (2009); Modes (2010); Lengowski (2011); Severo et al. (2012) Bellon (2013) e autores que trabalharam com outros gêneros como: Calonego (2009); Batista (2012); Cademartori (2012) e Calonego (2017).

A estabilidade dimensional é distinta em função do plano anatômico, ou seja, a madeira é anisotrópica, em que a direção tangencial é mais notável que a radial (MILITZ, 2002; ESTEVES et al., 2007). Kollmann e Coté (1968) relatam que a diferença anatômica no arranjo tangencial e radial é responsável pela diferença na contração dos planos, sendo que a primeira não possui os vasos radiais (raios) restringindo ou dificultando essa variação dimensional. Os mesmos autores afirmam que os vasos ou traqueóides no plano longitudinal são responsáveis pela pouca variação dimensional, oferecendo uma restrição mecânica. Foi possível observar que a variação dimensional foi mais acentuada no volume, por agregar todas as mudanças, depois no plano tangencial, radial e por fim no longitudinal.

Alguns autores em adicional (RAPP; SAILER, 2001; JUIZO, 2019; TÁVORA, 2019) corroboram para afirmar que a modificação térmica causa uma diminuição na

variação volumétrica. Em contrapartida, as mudanças no plano longitudinal geralmente são pequenas ou insignificantes.

Batista (2012) afirma que a diminuição das variações dimensionais tem relação com o teor de umidade de equilíbrio higroscópico. Segundo Ding, Gu e Liu (2011), a estabilidade dimensional é determinada principalmente em função dos grupos hidroxílicos disponíveis para a associação com a água, o que pode ser aplicado a diminuição do inchamento linear radial, e com a aplicação de calor ocorre a cristalização ou maior proporção desses sítios de adsorção (MARTON et al., 2003; TJEERDSMA; MILITZ, 2005; HAKKOU et al. (2005); BOONSTRA; TJEERSDMA, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009). Os dados apresentados de perda de massa e teor de umidade de equilíbrio com o ambiente reforçam os motivos da madeira de *Pinus taeda* L. ficar mais estável dimensionalmente com a modificação térmica. Com os dados experimentais foram determinados os coeficientes para os modelos quadráticos como pode ser observado na Tabela 15.

TABELA 15 –ANOVA PARA O INCHAMENTO LINEAR E VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab
IR	FSQR	8,270834	5,050329	1,637682
	FSQep	67,99554	19,16429	3,548033
	p-valor	0,0184*	R ²	0,892135
IT	FSQR	17,31538	5,050329	3,428564
	FSQep	10,57163	19,16429	0,551632
	p-valor	0,0035*	R ²	0,945401
IL	FSQR	0,829837	5,050329	0,164313
	FSQep	1,679039	19,16429	0,087613
	p-valor	0,5786 ^{ns}	R ²	0,453503
IV	FSQR	28,70122	5,050329	5,68304
	FSQep	49,43692	19,16429	2,579637
	p-valor	0,0011*	R ²	0,966331

Onde:

IR= Inchamento radial máximo (%)

IT= Inchamento tangencial máximo (%)

IL= Inchamento longitudinal máximo (%)

IV= Inchamento radial máximo (%)

FSQR = valor de F para soma quadrática da regressão

FSQep = valor de F soma quadrática erro puro

R^2 = variação explicada

p-valor = para 95% de intervalo de confiança

* = significativo a 95% de intervalo de confiança.

^{ns} = não significativo a 95% de intervalo de confiança.

É possível observar na Tabela 15, para inchamento linear tangencial, que o F_{cal} da regressão foi maior que o $F_{tabelado}$, bem como, o $F_{calculado}$ do erro puro foi menor que $F_{tabelado}$, demonstrando que os modelos podem ser validados e que não há falta de ajuste, ideia também reforçada por um p-valor abaixo de 0,05. Em contrapartida, o mesmo não ocorreu para o inchamento linear radial e longitudinal, dessa forma, nessa metodologia não é possível ajustar um modelo preditivo significativo.

No caso do inchamento volumétrico o $F_{calculado}$ da regressão foi maior que o $F_{tabelado}$, contudo, o $F_{calculado}$ do erro puro também foi maior que o $F_{tabelado}$, o que poderia ser considerado que o modelo possui falta de ajuste. Todavia, Garcia (2013), destaca que o $F_{calculado}$ do erro puro pode ser maior que o $F_{tabelado}$, quando o erro puro, que é calculado a partir dos pontos centrais é muito menor que a falta de ajuste, o que indicaria que nos pontos centrais há uma grande proximidade dos dados, ou seja, pouca variância. Em outras palavras, o modelo para o inchamento volumétrico pode ser considerado preditivo, sendo corroborado por um p-valor abaixo de 0,05. No caso do inchamento linear radial, inchamento linear tangencial e inchamento volumétrico, é possível encontrar os coeficientes do modelo, como pode ser observado nas tabelas 16, 17 e 18.

TABELA 16 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO LINEAR RADIAL DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	6,73	0,262282	25,6594	0
b1	-1,39022	0,160614	-8,65563	0,0003
b2	-0,508789	0,160614	-3,16777	0,0249
b11	0,035	0,191169	0,183084	0,8619
b22	0,1775	0,191169	0,928496	0,3958
b12	0,2425	0,227143	1,06761	0,3345

FONTE: O autor (2020).

TABELA 17 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO LINEAR TANGENCIAL DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	6,73	0,218983	25,6172	0
b1	-1,39022	0,134099	-8,63747	0,0003
b2	-0,508789	0,134099	-3,15917	0,0251
b11	0,035	0,15961	0,17306	0,8694
b22	0,1775	0,15961	0,932152	0,394
b12	0,2425	0,189645	1,05384	0,3402

FONTE: O autor (2020).

TABELA 18 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO VOLUMÉTRICO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	10,2655	0,283427	36,2191	0
b1	-2,0499	0,173563	-11,8107	0,0001
b2	-0,29948	0,173563	-1,72546	0,145
b11	-0,20179	0,206581	-0,976782	0,3735
b22	-0,01186	0,206581	-0,0574117	0,9564
b12	-0,03822	0,245455	-0,155727	0,8823

FONTE: O autor (2020).

Onde:

b0 = constante,

b1 = coeficiente linear de temperatura,

b2 = coeficiente linear de tempo,

b11 = coeficiente quadrático de temperatura,

b22 = coeficiente quadrático de tempo,

b12 = coeficiente de interação entre tempo e temperatura,

* = significativo em um intervalo de 95% de confiança.

É possível observar que para o inchamento linear radial e inchamento volumétrico apenas os coeficientes b0 e b1 foram significativos estatisticamente, demonstrando uma maior influência da temperatura nessas propriedades. Considerando o inchamento linear tangencial, os coeficientes b0, b1 e b2 foram significativos, demonstrando que para essas propriedades o tempo também apresentou uma maior relevância. Não houve interação significativas entre as

variáveis. Considerando os coeficientes encontrados é possível criar os modelos de predição, como pode ser observado nas Equação 27, 28 e 29.

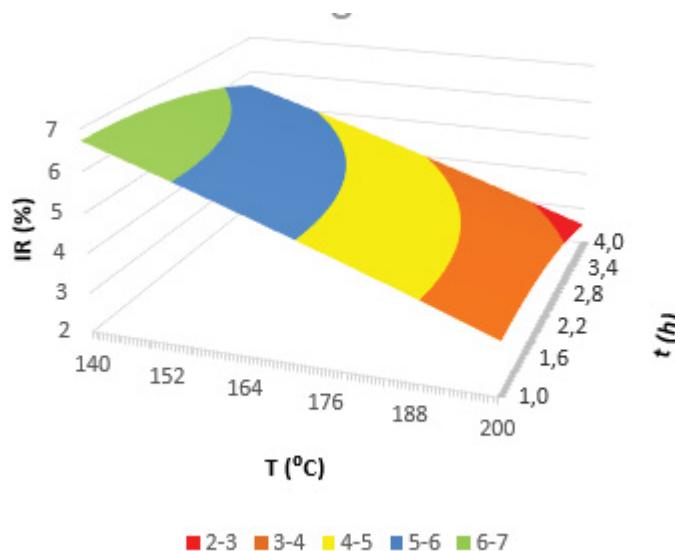
$$\widehat{IR} = (4,9037) - (1,1407)T_1 - (0,3448)t_2 - (0,0304)T_1^2 - (0,1513)t_2^2 + (0,0395)T_1t_2 \quad \text{Equação 27}$$

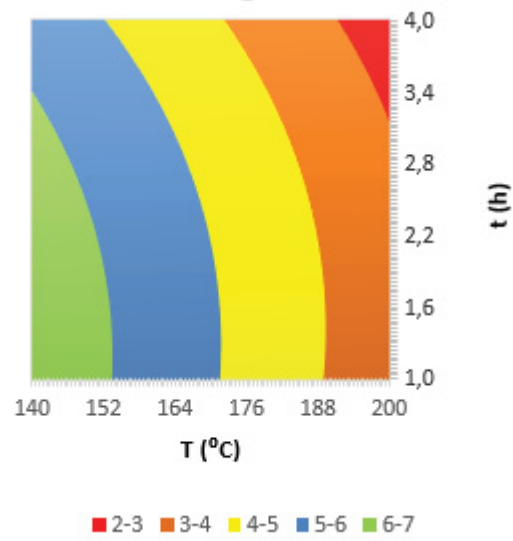
$$\widehat{IT} = (6,73) - (1,39022)T_1 - (0,5088)t_2 + (0,035)T_1^2 + (0,1775)t_2^2 + (0,2425)T_1t_2 \quad \text{Equação 28}$$

$$\widehat{IV} = (10,2655) - (2,0499)T_1 - (0,2994)t_2 - (0,2018)T_1^2 - (0,0119)t_2^2 - (0,0382)T_1t_2 \quad \text{Equação 29}$$

Com o modelo quadrático significativo gerado para o inchamento linear radial, inchamento linear tangencial e inchamento volumétrico, foi possível criar os gráficos de metodologia de superfície de resposta e as curvas de nível para facilitar a visualização com comportamento da equação.

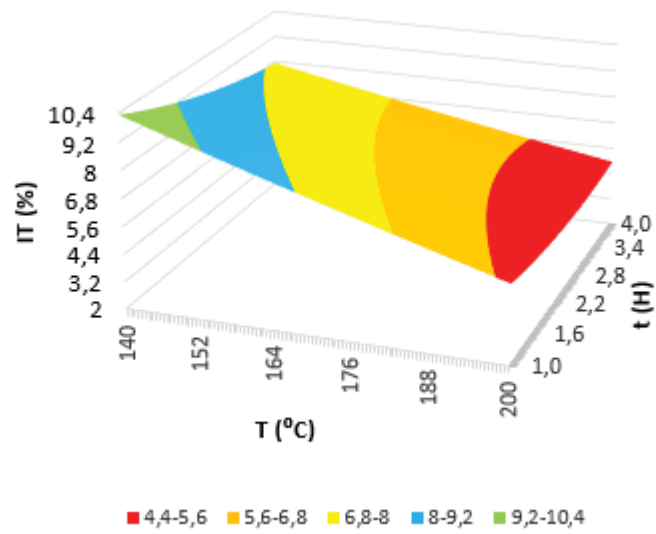
FIGURA 18 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO LINEAR RADIAL MÁXIMO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

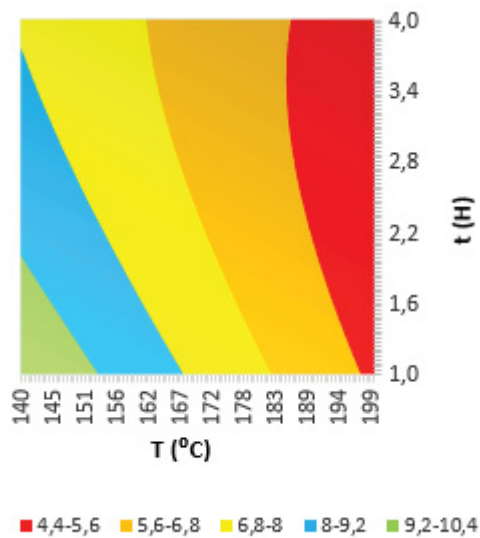




FONTE: O autor (2020).

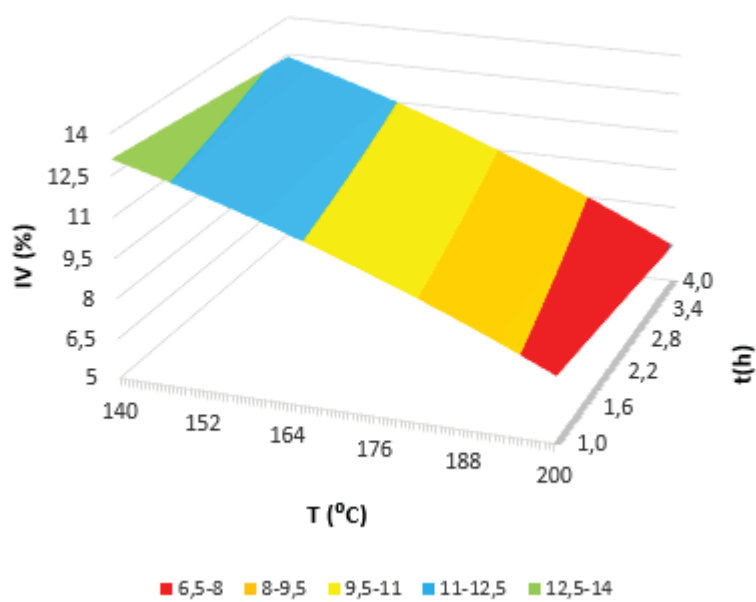
FIGURA 19 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO LINEAR TANGENCIAL MÁXIMO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

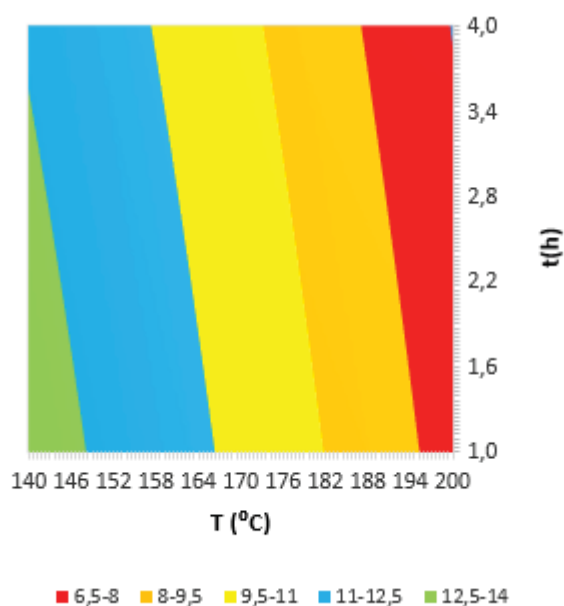




FONTE: O autor (2020).

FIGURA 20 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO VOLUMÉTRICO MÁXIMO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





FONTE: O autor (2020).

As Figuras 18, 19 e 20 representam a diminuição do inchamento linear radial, tangencial e volumétrico com o aumento da temperatura e do tempo. Contrapondo a significância estatística dos coeficientes, os gráficos mostram a influência do tempo. Essa propriedade em conjunto com as outras propriedades de estabilidade dimensional impactam diretamente nas aplicações finais do material, nos aspectos logísticos de carregamento, planejamento de produção e rendimento. Esses gráficos podem ser utilizados para dimensionar a estabilidade dimensional necessária para determinada aplicação, gastando o mínimo de tempo e/ou energia para se atingir o resultado esperado.

Os modelos e os gráficos recalculados para os coeficientes significativos estão apresentados no Apêndice 4.

4.3 COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE

A Tabela 19 apresenta os resultados experimentais e previstos pelo modelo para os coeficientes de retratibilidade.

TABELA 19 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA COEFICIENTES DE RETRATIBILIDADE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	QR	QR̂	QT	QT̂	QL	QL̂	QV	QV̂
------------	---	---	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----

	(°C)	(H)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)
1	148,79	1,44	0,12	0,11	0,22	0,23	0,01	0,01	0,34	0,34
2	191,21	1,44	0,08	0,09	0,14	0,15	0,00	0,01	0,22	0,25
3	148,79	3,56	0,12	0,11	0,21	0,22	0,01	0,01	0,33	0,34
4	191,21	3,56	0,06	0,07	0,14	0,15	0,00	0,01	0,20	0,22
5	170	2,5	0,10	0,10	0,19	0,19	0,02	0,01	0,29	0,29
6	170	2,5	0,10	0,10	0,19	0,19	0,00	0,01	0,28	0,29
7	170	2,5	0,11	0,10	0,20	0,19	0,02	0,01	0,30	0,29
8	140	2,5	0,09	0,11	0,25	0,24	0,01	0,01	0,30	0,33
9	170	1	0,10	0,11	0,20	0,19	0,02	0,02	0,35	0,33
10	200	2,5	0,08	0,07	0,15	0,14	0,01	0,00	0,23	0,18
11	170	4	0,10	0,10	0,19	0,18	0,03	0,02	0,30	0,31
Testemunha	-	-	0,14	-	0,26	-	0,02	-	0,40	-

FONTE: O autor (2020).

Onde:

T = temperatura (°C)

t = tempo (H)

QR = retratibilidade radial (%/%)

QT = retratibilidade tangencial (%/%)

QL = retratibilidade longitudinal (%/%)

QV = retratibilidade volumétrica (%/%)

^ = variáveis com o acento circunflexo são as previstas pelo modelo,

Níveis para a temperatura = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (140; 148,79; 170; 191,21;200) °C,

Níveis para o tempo = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (1; 1,44; 2,5; 3,56; 4) horas.

O coeficiente de retratibilidade representa a razão entre a variação dimensional pela variação mássica. É possível observar na tabela 19, que o coeficiente de retratibilidade tendeu a diminuir com o aumento da temperatura e do tempo de modificação térmica, bem como, quando comparada as amostras testemunha.

Muitas vezes o coeficiente de retratibilidade é confundido por vários autores com os coeficientes de inchamento ou contração. Dessa maneira, não há muitos dados a serem comparados na literatura quando essa propriedade é relacionada com a modificação térmica. Calonego (2009) encontrou uma tendência de diminuição do

coeficiente de retratibilidade em madeiras modificadas termicamente para os planos tangencial e longitudinal. Este autor atribui essa tendência com a melhoria da estabilidade dimensional, diminuição dos coeficientes de inchamento e diminuição do teor de umidade de equilíbrio.

Calonego (2017) afirma que para que haja uma diminuição no coeficiente de retratibilidade, os valores de redução do inchamento devem ser maiores que a redução no teor de umidade de equilíbrio, fato esse que pode ser comprovado com os valores encontrados nesse estudo, com uma redução de 15,09% para 7,12% no inchamento volumétrico, enquanto há uma diminuição de 12,88% para 7,23% no teor de umidade de equilíbrio ambiente. Com os dados experimentais é possível realizar uma ANOVA como pode ser observado na Tabela 20.

TABELA 20 – ANOVA PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE LINEAR E VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab
QR	FSQR	1,988883	5,050329	0,393812
	FSQep	6,847698	19,16429	0,357315
	p-valor	0,2343 ^{ns}	R ²	0,665427
QT	FSQR	13,11481	5,050329	2,596823
	FSQep	16,62935	19,16429	0,867726
	p-valor	0,0067*	R ²	0,929152
QL	FSQR	0,496399	5,050329	0,09829
	FSQep	0,979326	19,16429	0,051102
	p-valor	0,7698 ^{ns}	R ²	0,331729
QV	FSQR	6,218137	5,050329	1,231234
	FSQep	11,8295	19,16429	0,617268
	p-valor	0,0327*	R ²	0,86146

Onde:

QR = retratibilidade radial (%/%)

QT = retratibilidade tangencial (%/%)

QL = retratibilidade longitudinal (%/%)

QV = retratibilidade volumétrica (%/%)

FSQR = valor de F para soma quadrática da regressão

FSQep = valor de F soma quadrática erro puro

R² = variação explicada

p-valor = para 95% de intervalo de confiança

* = significativo a 95% de intervalo de confiança.

^{ns} = não significativo a 95% de intervalo de confiança.

É interessante observar que apenas o QT e QV foram significativos estatisticamente, enquanto QR e QL não apresentaram distinção. Dessa forma, os coeficientes foram gerados apenas para as duas primeiras propriedades citadas. Como o plano tangencial geralmente varia de forma mais abrupta dimensionalmente, pode ter contribuído para que a variação volumétrica apresentasse uma tendência mais contundente, entretanto, o fato dos parâmetros de QR e QL não terem sido apropriados para validar o modelo, podem ter contribuído para uma baixa explicação da variância R^2 do QV em relação ao QT, pois o primeiro relaciona os outros três coeficientes de retratibilidade. As Tabela 21 e 22 apresentam os coeficientes gerados.

TABELA 21 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE TANGENCIAL DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	0,191533	0,00860928	22,2472	0
b1	-0,03622	0,00527209	-6,86948	0,001
b2	-0,00368	0,00527209	-0,697933	0,5163
b11	-0,00142	0,00627504	-0,226038	0,8301
b22	-0,00306	0,00627504	-0,488081	0,6461
b12	0,00704	0,00745586	0,94422	0,3884

FONTE: O autor (2020).

TABELA 22 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	0,29	0,0171979	16,8625	0
b1	-0,05216	0,0105315	-4,95273	0,0043
b2	-0,00759	0,0105315	-0,720582	0,5034
b11	-0,01938	0,012535	-1,54567	0,1828
b22	0,015625	0,012535	1,24651	0,2678
b12	-0,0125	0,0148938	-0,839273	0,4396

FONTE: O autor (2020).

Onde:

b0 = constante,

- b1 = coeficiente linear de temperatura,
 b2 = coeficiente linear de tempo,
 b11 = coeficiente quadrático de temperatura,
 b22 = coeficiente quadrático de tempo,
 b12 = coeficiente de interação entre tempo e temperatura,
 * = significativo em um intervalo de 95% de confiança.

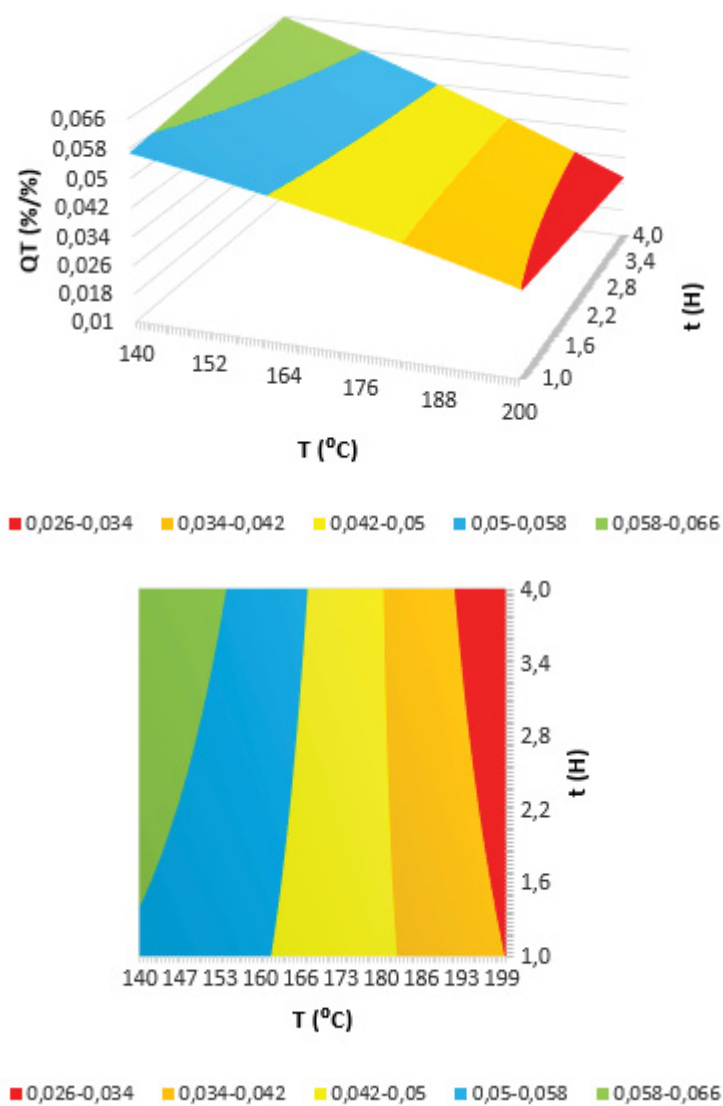
Nas tabelas 21 e 22 é interessante observar que apenas os coeficientes b0 e b1 foram significativos, representando uma influência maior da temperatura. É importante destacar que nenhum coeficiente quadrático, ou de interação foi significativo estatisticamente. Com base nos coeficientes é possível gerar os modelos estatísticos válidos para a predição dessas propriedades, como evidenciado nas Equação 30 e Equação 31.

$$\widehat{QT} = (0,191533) - (0,03622)T_1 + (0,00368)t_2 - (0,00142)T_1^2 - (0,00306)t_2^2 + (0,00704)T_1t_2 \quad \text{Equação 30}$$

$$\widehat{QV} = (0,2913) - (0,05216)T_1 - (0,00759)t_2 - (0,01938)T_1^2 + (0,015625)t_2^2 - (0,0125)T_1t_2 \quad \text{Equação 31}$$

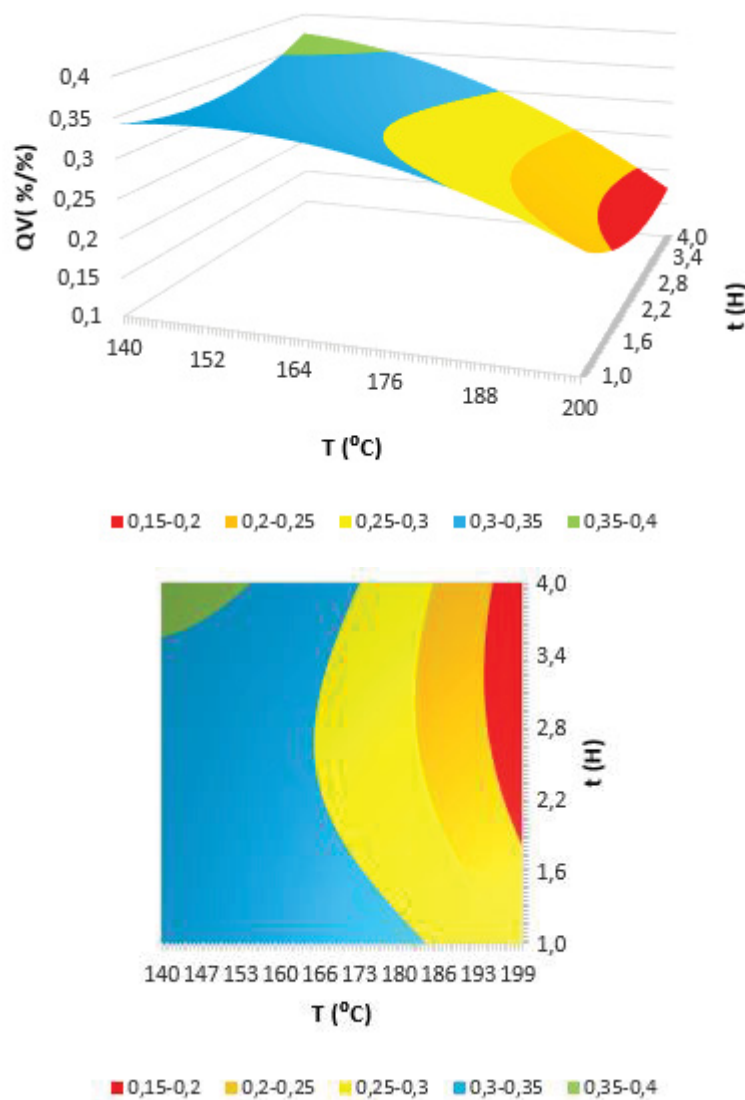
Com os modelos quadráticos significativos gerados para coeficiente de retratibilidade tangencial e volumétrico, foi possível criar os gráficos de metodologia de superfície de resposta e as curvas de nível para facilitar a visualização com comportamento da equação, como pode ser observado nas Figuras 21 e 22.

FIGURA 21 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE TANGENCIAL DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 22 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

As Figuras 21 e 22 representam a diminuição dos coeficientes de retratibilidade, principalmente em função da temperatura. Esse comportamento corrobora para a afirmação de que a modificação térmica melhora a estabilidade dimensional, em especial, quando é levado em consideração o volume, em especial em temperaturas pouco acima de 170°C.

Os modelos e os gráficos recalculados para os coeficientes significativos estão apresentados no Apêndice 4.

4.4 ANISOTROPIA DE INCHAMENTO, TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO

A Tabela 23 apresenta os resultados experimentais e previstos pelo modelo para o coeficiente anisotrópico, taxa de absorção de água e eficiência anti-inchamento.

TABELA 23 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA COEFICIENTE DE ANISOTROPIA, TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	Ai	$\hat{A}i$	TA	$\hat{T}A$	EAI	$\hat{E}A\hat{I}$
	(°C)	(H)	(%/%)	(%/%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	148,79	1,44	1,40	1,44	50,61	52,30	17,02	18,08
2	191,21	1,44	1,60	1,53	49,54	50,75	48,11	44,74
3	148,79	3,56	1,60	1,56	52,83	55,17	20,70	21,54
4	191,21	3,56	1,75	1,60	49,09	50,93	52,80	49,22
5	170	2,5	1,39	1,37	59,43	58,14	31,54	31,98
6	170	2,5	1,36	1,37	57,87	58,14	31,74	31,98
7	170	2,5	1,37	1,37	57,13	58,14	32,66	31,98
8	140	2,5	1,44	1,41	51,95	49,83	17,32	15,45
9	170	1	1,53	1,53	57,03	55,71	28,22	29,33
10	200	2,5	1,37	1,51	47,16	45,74	49,46	53,86
11	170	4	1,56	1,67	60,08	57,86	33,53	34,94
Testemunha	-	-	1,47	-	52,83		0,00	

FONTE: O autor (2020).

Onde:

T = temperatura (°C)

t = tempo (H)

Ai = Anisotropia de inchamento (%/%)

TA = Taxa de absorção de água (%)

EAI = Eficiência anti-inchamento (%)

$\hat{}$ = variáveis com o acento circunflexo são as previstas pelo modelo,

Níveis para a temperatura = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (140; 148,79; 170; 191,21;200) °C,

Níveis para o tempo = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (1; 1,44; 2,5; 3,56; 4) horas.

Não é possível observar na Tabela 23, uma tendência para anisotropia de inchamento em relação as temperaturas e tempos utilizados. Resultados que corroboram com Lengowski (2011) e Bellon (2013), aos quais, não observaram

diferença estatística nesta propriedade, em contrapartida, Calonego (2009); Modes (2010), Araújo et al. (2016) e Huller (2017), encontraram uma tendência de decréscimo desse coeficiente com o aumento da temperatura, o que contrapõe esse estudo. Isso pode ter acontecido, pois como visto para os resultados de coeficiente de retratibilidade, o comportamento do plano radial não foi significativo estatisticamente e o plano tangencial foi significativo estatisticamente. Como o coeficiente anisotrópico é uma razão entre o inchamento linear tangencial e o radial, para que haja uma tendência de diminuição, o inchamento linear tangencial deve diminuir de uma forma mais acentuada que o radial (HAYGREEN; BOWYER, 1996; OLIVEIRA, 1997; CHAUHAN; AGGARWAL, 2004), fato esse que não ocorreu nesse estudo, pois o primeiro teve uma redução de 3,43 pontos percentuais, enquanto que o segundo teve uma redução de 3,64 comparado o tratamento com maior valor menos o de menor valor.

Em relação a taxa de absorção de água, é possível observar que se for comparado a testemunha com os tratamentos mais agressivos, há uma redução. Entretanto, também é importante ressaltar que nos pontos centrais houve uma tendência de aumento nessa propriedade. Resultado que corrobora com o estudo de Távora (2019), que encontrou um comportamento de aumento de taxa de absorção próximo a 160°C e 180°C, para depois, diminuir próximo a 200°C. Esse resultado está parcialmente de acordo com Modes (2010), que trabalhando apenas até uma temperatura de 160°C, observou uma tendência de aumento nessa propriedade.

Em um primeiro momento, pode ser contraditório ao observador que haja uma maior estabilidade dimensional e ao mesmo tempo um aumento em determinada faixa de temperatura da taxa de absorção de água. Vale ressaltar que o inchamento ou contração estão relacionados a água de impregnação ou de difusão, que estão ligadas nas paredes celulares e nos espaços intracelulares, enquanto a taxa de absorção de água também está conectada a água livre ou capilar (SKAAR, 1972; SIAU, 1995). Nesse sentido, França (2019) e Juízo (2019) encontraram uma diminuição na espessura da parede celular e algumas fissuras com o aumento da temperatura, o que está diretamente relacionado com a quantidade de água que a amostra pode absorver.

A modificação térmica, em coníferas, causa danos nas células de parênquima nos raios e células epiteliais dos canais resiníferos. Como consequência do tratamento térmico, em coníferas, a ocorrência de danos as células de parênquima

nos raios e células epiteliais dos canais resiníferos (BONSTRA et al., 2006). A degradação das hemiceluloses é o principal fator causador destes danos, pelo motivo de estar bem presente na lamela média.

A eficiência anti-inchamento apresentou uma tendência de aumentar em relação ao aumento da temperatura e tempo, o que está de acordo com Esteves et al. (2008); Modes (2010) e Cademartori (2012). Também é importante destacar que nesse mesmo estudo algumas propriedades como: teor de umidade de equilíbrio, perda de massa, inchamento linear e volumétrico, reforçam a melhora na estabilidade dimensional da madeira, pelos mesmos motivos, ou seja, maior hidrofobicidade. Com os dados experimentais é possível realizar uma ANOVA como pode ser observado na Tabela 24.

TABELA 24 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA A ANISOTROPIA DE INCHAMENTO, TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab
Ai	FSQR	1,6349	5,050329	0,323722
	FSQep	95,73279	19,16429	4,995373
	p-valor	0,3047 ^{ns}	R ²	0,620479
TA	FSQR	6,153217	5,050329	1,21838
	FSQep	6,335062	19,16429	0,330566
	p-valor	0,0339*	R ²	0,860203
EAI	FSQR	28,70122	5,050329	5,68304
	FSQep	49,43692	19,16429	2,579637
	p-valor	0,0011*	R ²	0,966331

Onde:

Ai = Anisotropia de inchamento (%/%)

TA = Taxa de absorção de água (%)

EAI = Eficiência anti-inchamento (%)

FSQR = valor de F para soma quadrática da regressão

FSQep = valor de F soma quadrática erro puro

R² = variação explicada

p-valor = para 95% de intervalo de confiança

* = significativo a 95% de intervalo de confiança.

^{ns} = não significativo a 95% de intervalo de confiança.

É possível observar na Tabela 24 que os parâmetros da anisotropia de inchamento não foram significativos estatisticamente para validação do modelo, comprovado tanto pelo p-valor, valor de R^2 , quanto pelo teste F. Por outro lado, para a taxa de absorção de água, o F_{tabelado} foi maior que o $F_{\text{calculado}}$ para a regressão, também sendo verificado que o $F_{\text{calculado}}$ para o erro foi menor que o F_{tabelado} , indicando que não há falta de ajuste, também com um p-valor abaixo de 0,05 e com o R^2 elevado explicando 86% do modelo.

No caso da eficiência anti-inchamento, o $F_{\text{calculado}}$ foi maior que o F_{tabelado} para o erro puro, o que talvez indique uma falta de ajuste do modelo, contudo, tendo um R^2 elevado e um p-valor menor que 0,05, tudo indica, que isso pode ter ocorrido, assim como explicado por Garcia (2013), que algumas vezes isso acontece quando o erro puro muito menor que a falta de ajuste, o que não invalidaria o modelo proposto. Dessa forma, não é interessante a criação de um modelo para a anisotropia de inchamento, mas sim para a taxa de absorção de água e para a eficiência anti-inchamento. As tabelas 25 e 26 apresentam os coeficientes.

TABELA 25 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	58,1412	1,39287	41,7422	0**
b1	-1,44881	0,852952	-1,69858	0,1502
b2	0,761637	0,852952	0,892943	0,4128
b11	-5,17813	1,01522	-5,10052	0,0038**
b22	-0,6776	1,01522	-0,667441	0,5341
b12	-0,67078	1,20626	-0,55608	0,6021

FONTE: O autor (2020).

TABELA 26 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	31,9805	1,878	17,0291	0**
b1	13,5827	1,15003	11,8107	0,0001**
b2	1,98433	1,15003	1,72546	0,145
b11	1,33703	1,36881	0,976782	0,3735
b22	0,078586	1,36881	0,0574117	0,9564
b12	0,253274	1,62639	0,155727	0,8823

FONTE: O autor (2020).

Onde:

b0 = constante,

b1 = coeficiente linear de temperatura,

b2 = coeficiente linear de tempo,

b11 = coeficiente quadrático de temperatura,

b22 = coeficiente quadrático de tempo,

b12 = coeficiente de interação entre tempo e temperatura,

* = significativo em um intervalo de 95% de confiança.

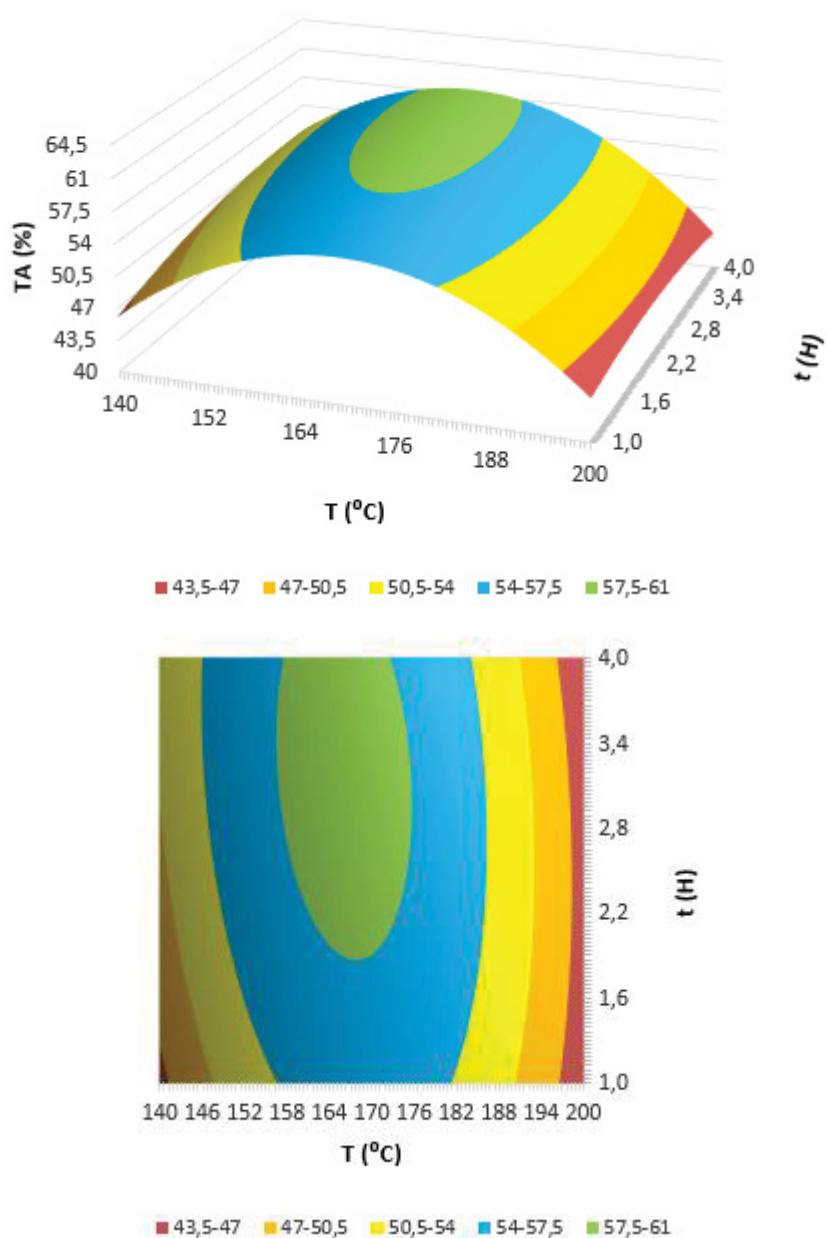
Para a taxa de absorção de água apenas os coeficientes b0 e b11 (constante e temperatura quadrática) foram significativos. E para a eficiência anti-inchamento os coeficientes b0 e b1 foram significativos. Em ambos os casos a temperatura teve maior influência em relação ao tempo, também sendo destacado que não há interação entre as variáveis de entrada tempo e temperatura. Os modelos estão representados na Equação 32 e Equação 33.

$$\widehat{T\bar{A}} = (58,1412) - (1,44881)T_1 + (0,7616)t_2 - (5,1781)T_1^2 - (0,6776)t_2^2 - (0,6708)T_1t_2 \quad \text{Equação 32}$$

$$\widehat{E\bar{A}I} = (31,9805) + (13,5827)T_1 + (1,9843)t_2 + (1,3370)T_1^2 + (0,0786)t_2^2 + (0,2533)T_1t_2 \quad \text{Equação 33}$$

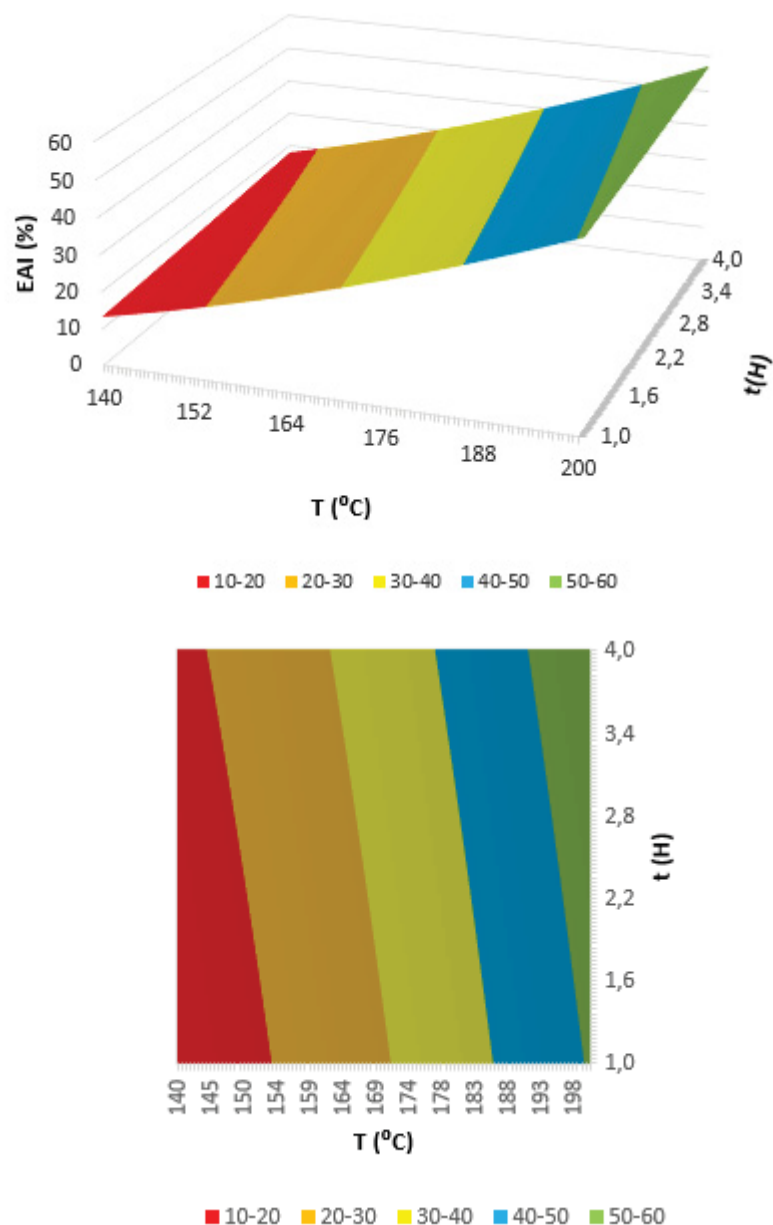
Com os modelos quadráticos significativos gerados, foi possível criar os gráficos de metodologia de superfície de resposta e as curvas de nível (Figuras 23 e 24) para facilitar a visualização com comportamento da equação.

FIGURA 23 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 24 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

As Figuras 23 e 24 demonstram o comportamento da taxa de absorção de água e da eficiência anti-inchamento. No primeiro caso, como relatado anteriormente na discussão é visível o aumento próximo aos pontos centrais, enquanto no segundo caso há uma tendência de aumento com a temperatura e tempo, reforçando a afirmação de uma maior estabilidade dimensional. Os modelos recalculados estão dispostos nos no Apêndice 4.

No caso da taxa de absorção de água, é factível calcular o ponto ótimo utilizando as derivadas parciais para o tempo e temperatura. As Equação 34 e Equação 35 explicitam as derivadas.

$$\frac{\partial \widehat{TA}}{\partial T_1} = (-1,44881) - (10,3562)T_1 - (0,6708)t_2 = 0 \quad \text{Equação 34}$$

$$\frac{\partial \widehat{TA}}{\partial t_2} = (0,7616) - (1,3552)t_2 - (0,6708)T_1 = 0 \quad \text{Equação 35}$$

Com as derivadas parciais calculadas e igualadas a 0 é possível calcular o sistema com duas variáveis e encontrar o ponto crítico, nesse caso, um ponto de máximo, que seria em 166,12°C e 3,19 horas em variáveis não codificadas (-0,18214;0,652139), alcançando 58,87% de taxa de absorção de água. Para a madeira, a taxa de absorção de água pode ser algo negativo, dessa forma, o ponto ótimo encontrado, seria o pior cenário para madeiras que ficarão expostas a muita humidade ou imersas na água. Sendo assim, recomenda-se para esse tipo de utilização, temperaturas e tempo próximos a 200°C e 4 horas, respectivamente.

4.5 MASSA ESPECÍFICA

A Tabela 27 apresenta os resultados experimentais e previstos pelo modelo para a massa específica aparente (65% de umidade relativa do ar e 20°C), massa específica aparente básica, massa específica saturada e massa específica anidra.

TABELA 27 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	MEap	\widehat{MEap}	MEb	\widehat{MEb}	MEs	\widehat{MEs}	ME _{0%}	$\widehat{ME}_{0\%}$
	(°C)	(H)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
1	148,79	1,44	0,62	0,62	0,49	0,48	0,95	0,96	0,55	0,56
2	191,21	1,44	0,52	0,53	0,48	0,48	0,93	0,95	0,50	0,50
3	148,79	3,56	0,59	0,57	0,50	0,50	1,03	1,00	0,56	0,58
4	191,21	3,56	0,49	0,49	0,45	0,46	0,93	0,91	0,45	0,47
5	170	2,5	0,56	0,56	0,52	0,51	1,04	1,01	0,56	0,58
6	170	2,5	0,61	0,56	0,51	0,51	1,00	1,01	0,59	0,58
7	170	2,5	0,52	0,56	0,50	0,51	0,98	1,01	0,58	0,58
8	140	2,5	0,60	0,61	0,49	0,49	0,98	0,99	0,57	0,56
9	170	1	0,59	0,58	0,49	0,49	0,99	0,96	0,56	0,56
10	200	2,5	0,51	0,49	0,46	0,46	0,91	0,91	0,45	0,44
11	170	4	0,52	0,53	0,50	0,49	0,93	0,96	0,57	0,55

Testemunha	-	-	0,63		0,53		1,05		0,58	
------------	---	---	------	--	------	--	------	--	------	--

FONTE: O autor (2020).

Onde:

T = temperatura (°C)

t = tempo (H)

MEap = massa específica aparente (g/cm³)

MEb = Massa específica aparente básica (g/cm³)

MEs = Massa específica saturada (g/cm³)

ME0% = massa específica anidra (g/cm³)

^ = variáveis com o acento circunflexo são as previstas pelo modelo,

Níveis para a temperatura = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (140; 148,79; 170; 191,21;200) °C,

Níveis para o tempo = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (1; 1,44; 2,5; 3,56; 4) horas.

É possível observar na Tabela 27, que os tratamentos com maior temperatura e tempo causaram uma tendência de diminuição na massa específica aparente a 12%. Essa mesma tendência foi observada por alguns autores que trabalharam com modificação térmica de espécies do gênero pinus como: Metsä-Kortelainen et al (2005), Modes (2010), Bellon (2013), Poubel et al (2015), Huller et al. (2017) e Schulz et al. (2020) e autores que trabalharam com outros gêneros como: Calonego (2009), Batista (2012), Calonego (2017), Huller et al. (2017) e Juizo (2019). No caso da massa específica aparente básica, essa redução também foi encontrada por Poubel (2010); Lengowski (2011); Batista (2012) e Huller (2017). Para a massa específica saturada, não foram encontrados autores que realizaram esse ensaio para fins de comparação. Para a massa específica anidra, esse comportamento está de acordo com Calonego (2009); Batista et al. (2011); Batista (2012); Calonego et al. (2012); Bellon (2013) e Araújo et al. (2016).

Contudo, não há um consenso na literatura, pois muitos autores encontraram resultados não significativos estatisticamente para massa específica aparente (Calonego et al., 2012; Cademartori et al., 2015; Schultz, 2020), para massa específica aparente básica (CALONEGO, 2009; ARAÚJO, 2010; BATISTA et al., 2011; CADEMARTORI, 2012 ;CALONEGO et al., 2014; CONTE et al.,2015; ARAÚJO, 2016)

e para a massa específica anidra (CADEMARTORI, 2012; CALONEGO et al., 2014; TÁVORA, 2019), para a modificação térmica da madeira.

Como a massa específica é uma razão entre a massa e o volume, as propriedades de perda de massa, inchamento, taxa de absorção de água, teor de umidade de equilíbrio, entre outras, a influenciam diretamente. Por exemplo, se a perda de massa não ocorrer na mesma proporção que a variação volumétrica. Adicionalmente a isso, as diferenças entre espécies, método e equipamento aplicado para a modificação térmica, bem como condições de temperatura e tempo podem explicar esse não consenso na literatura.

A massa específica é uma das propriedades que mais influenciam em outras propriedades sendo um parâmetro para a destinação final como produto (KEINERT JR., 1980). Por esse motivo, entender seu comportamento perante a modificação térmica é de fundamental importância para a disseminação dessa tecnologia. Com os dados experimentais foi possível realizar uma ANOVA como pode ser observado na Tabela 28.

TABELA 28 –ANOVA SIMPLIFICADA PARA MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab
Meap _{12%}	FSQR	3,629553	5,050329	0,718677
	FSQep	0,122904	19,16429	0,006413
	p-valor	00,0917 ^{ns}	R ²	0,783996
Meb	FSQR	9,379722	5,050329	1,85725
	FSQep	1,140527	19,16429	0,059513
	p-valor	0,0141*	R ²	0,9036583
Meap _{sat}	FSQR	2,133834	5,050329	0,422514
	FSQep	1,26394	19,16429	0,065953
	p-valor	0,2126 ^{ns}	R ²	0,680902
Meap _{0%}	FSQR	15,27949	5,050329	3,025445
	FSQep	3,351709	19,16429	0,174893
	p-valor	0,0048*	R ²	0,938573

Onde:

Meap= massa específica aparente a 0%, 12% e saturada (g/cm³)

Meb = massa específica básica (g/cm³)

FSQR = valor de F para soma quadrática da regressão

FSQep = valor de F soma quadrática erro puro

R^2 = variação explicada

p-valor = para 95% de intervalo de confiança

* = significativo a 95% de intervalo de confiança.

^{ns} = não significativo a 95% de intervalo de confiança.

Pode-se observar na Tabela 28, que os parâmetros analisados para massa específica básica e a aparente anidra foram significativas estatisticamente, o que pode ser corroborado por um $F_{calculado}$ da regressão maior que o $F_{tabelado}$, que não há falta de ajuste, e o R^2 foi 0,90 e 0,94 respectivamente. Todavia, para a massa específica aparente a 12% e a aparente saturada, a ANOVA não foi significativa e não seria conveniente criar modelos para essas propriedades. Nos casos em que foram utilizados a massa seca como numerador para os cálculos, os modelos foram significativos estatisticamente, demonstrando que a massa de água pode ser conflitante na avaliação dessas propriedades quando o assunto é modificação térmica da madeira.

A taxa de absorção de água, por ter um comportamento parabólico com concavidade para baixo (Figura 23) ajuda a explicar o porquê as massas específicas, calculadas a partir de uma massa úmida podem ser controversas. Batista (2012), afirma que caso a redução de massa e volume sejam proporcionais, o resultado não se alterará em relação a madeira original. Em outras palavras, há uma redução de valores absolutos, mas geram um quociente similar. Dessa maneira, Calonego (2009) e Batista et al. (2011) propuseram que a massa específica anidra é o melhor parâmetro para análise da redução da massa específica.

Para a massa específica aparente básica e anidra foi possível estabelecer os coeficientes do modelo quadrático, como pode ser observado nas Tabelas 29 e 30.

TABELA 29 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE BÁSICA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	0,508402	0,00494368	102,839	0*
b1	-0,012401	0,00302738	-4,09629	0,0094*
b2	-0,000856102	0,00302738	-0,282787	0,7887
b11	-0,0168477	0,0036033	-4,67562	0,0055*
b22	-0,00963181	0,0036033	-2,67306	0,0442*
b12	-0,0107747	0,00428136	-2,51666	0,0534

FONTE: O autor (2020).

TABELA 30 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE MASSA ESPECÍFICA ANIDRA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	0,576069	0,00985941	58,4283	0*
b1	-0,04168	0,00603763	-6,90415	0,001*
b2	-0,00287	0,00603763	-0,475638	0,6544
b11	-0,03628	0,00718622	-5,04892	0,0039*
b22	-0,01151	0,00718622	-1,60189	0,1701
b12	-0,01478	0,0085385	-1,73128	0,144

FONTE: O autor (2020).

Onde:

b0 = constante,

b1 = coeficiente linear de temperatura,

b2 = coeficiente linear de tempo,

b11 = coeficiente quadrático de temperatura,

b22 = coeficiente quadrático de tempo,

b12 = coeficiente de interação entre tempo e temperatura,

* = significativo em um intervalo de 95% de confiança.

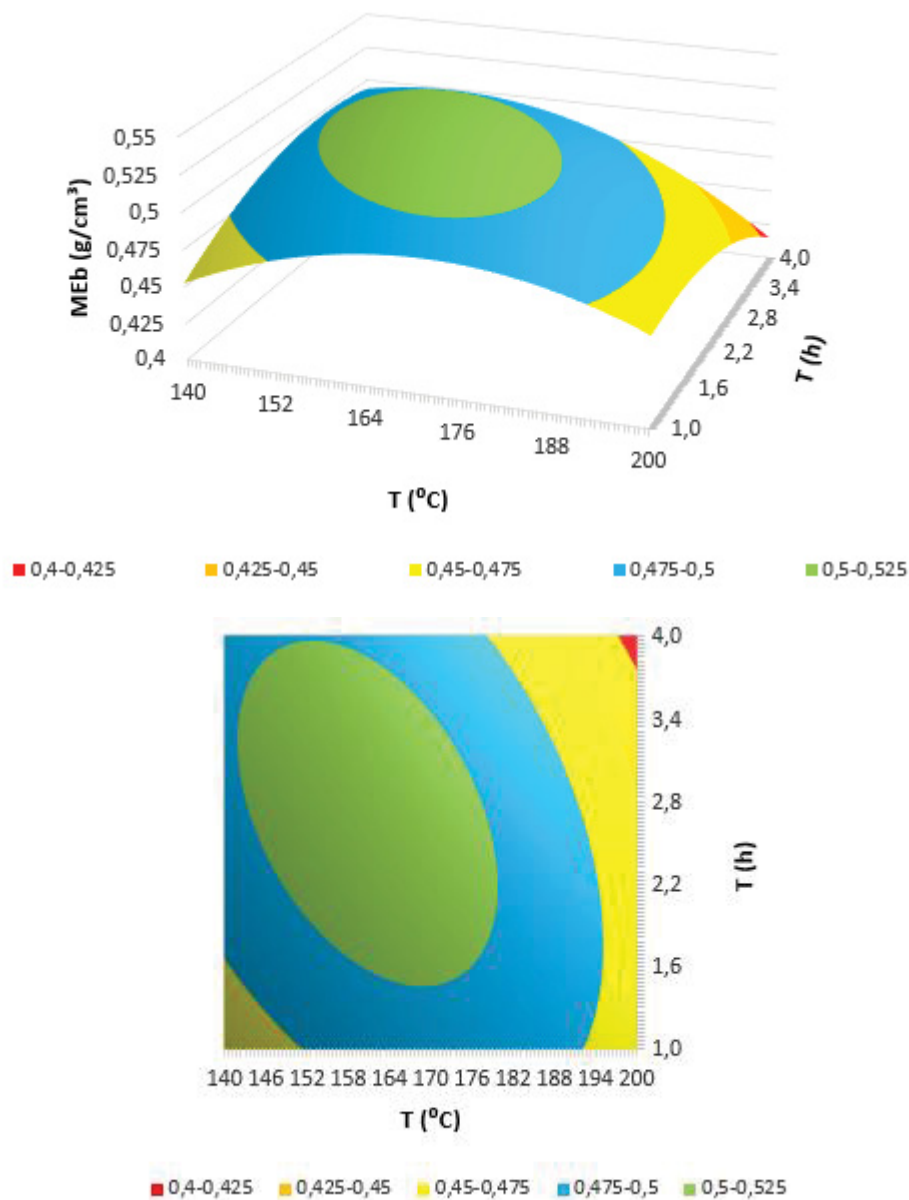
Os coeficientes b0, b1, b11 e b22 foram significativos para a massa específica aparente básica, demonstrando que há influência da constante, da temperatura, da temperatura quadrática e o tempo quadrático, respectivamente. Para a massa específica anidra apenas os coeficientes b0, b1 e b11, comprovando uma maior influência da temperatura nessa propriedade. Em nenhum dos dois casos houve interação estatística entre o tempo e a temperatura. Em todo o caso, é factível realizar os modelos estatísticos conforme as Equação 36 e Equação 37.

$$\widehat{MEb} = (0,5084) - (0,0124)T_1 + (0,0009)t_2 - (0,0168)T_1^2 - (0,0096)t_2^2 - (0,0108)T_1t_2 \quad \text{Equação 36}$$

$$\widehat{ME}_{0\%} = (0,5761) - (0,0417)T_1 - (0,0029)t_2 - (0,0363)T_1^2 - (0,0115)t_2^2 - (0,0148)T_1t_2 \quad \text{Equação 37}$$

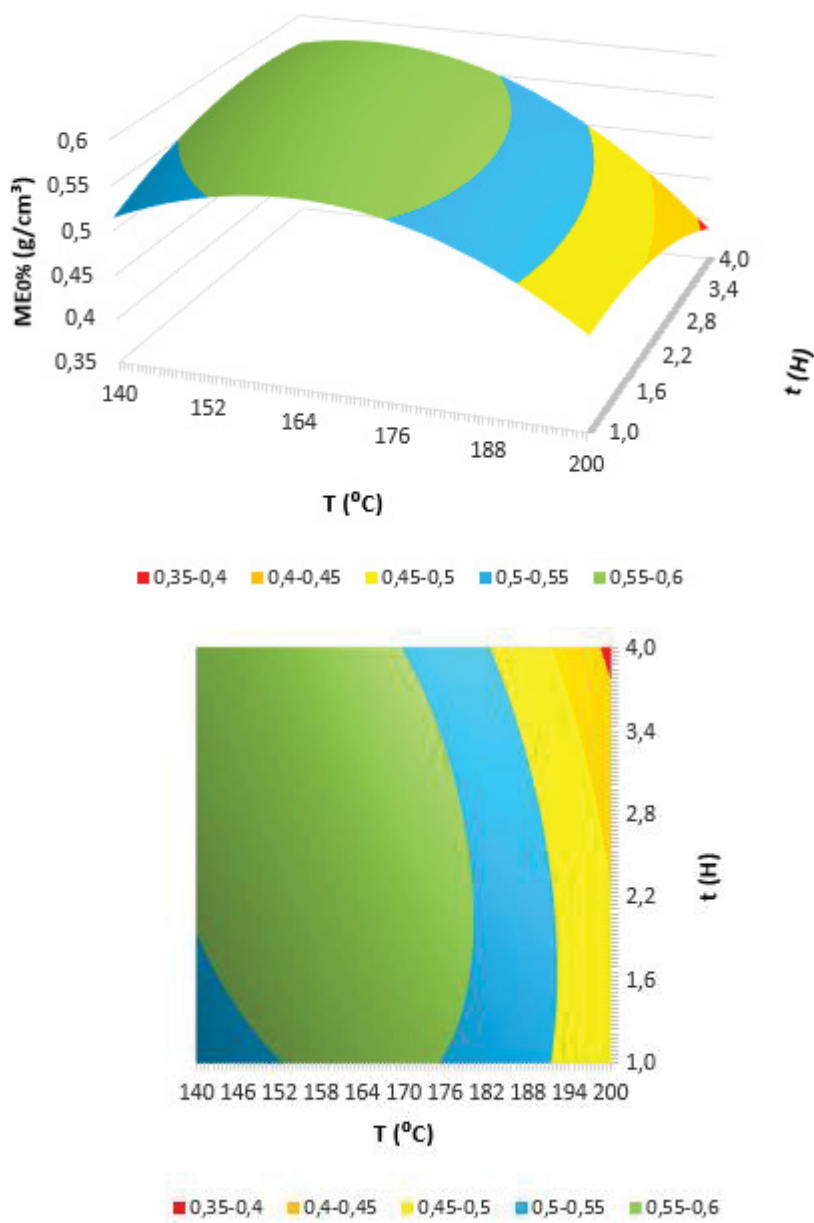
Com os modelos quadráticos significativos gerados para coeficiente de massa específica aparente básica e anidra, foi possível criar os gráficos de metodologia de superfície de resposta e as curvas de nível (Figuras 25 e 26) para facilitar a visualização com comportamento da equação.

FIGURA 25 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A MASSA ESPECÍFICA APARENTE BÁSICA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 26 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A MASSA ESPECÍFICA ANIDRA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

As Figuras 25 e 26 representam o comportamento da massa específica aparente básica e anidra. Cabe destacar que os gráficos são quadráticos com a concavidade para baixo, o que indica que em certa faixa de temperatura e tempo há um ponto de máximo. Isso deve-se ao fato da perda de massa próxima aos pontos centrais ser mais acentuada ou inchamento volumétrico ser menos proeminente. Sendo que em temperaturas próximas a 180°C começa a haver uma diminuição visível da massa específica.

O entendimento da massa específica é importante para correlações com outras propriedades, principalmente mecânicas e para o planejamento logístico de

transporte. Os modelos e gráficos recalculados podem ser observados no Apêndice 4.

Por haver pontos de máximo é possível encontrar os valores ótimos para ambos os modelos. O cálculo das derivadas parciais para o modelo de massa específica aparente básica está representado na Equação 38 e Equação 39.

$$\frac{\partial \widehat{ME}_b}{\partial T_1} = (-0,0124) - (0,0336)T_1 - (0,0108)t_2 = 0 \quad \text{Equação 38}$$

$$\frac{\partial \widehat{ME}_b}{\partial t_2} = (-0,0009) - (0,0192)t_2 - (0,0108)T_1 = 0 \quad \text{Equação 39}$$

Com as derivadas parciais calculadas e igualadas a 0, foi possível calcular o sistema com duas variáveis e encontrar o ponto crítico, nesse caso, um ponto de máximo, que seria em 160,81°C e 2,71 horas em variáveis não codificadas (-0,43211; 0,196185), alcançando 0,5110 g/cm³ massa específica aparente básica. O cálculo das derivadas parciais para o modelo de massa específica anidra está representado na Equação 40 e Equação 41.

$$\frac{\partial \widehat{ME}_{0\%}}{\partial T_1} = (-0,0417) - (0,0726)T_1 - (0,0148)t_2 = 0 \quad \text{Equação 40}$$

$$\frac{\partial \widehat{ME}_{0\%}}{\partial t_2} = (-0,0029) - (0,030)t_2 - (0,0148)T_1 = 0 \quad \text{Equação 41}$$

Com as derivadas parciais calculadas e igualadas a 0, foi possível calcular o sistema com duas variáveis e encontrar o ponto crítico, nesse caso, um ponto de máximo, que seria em 156,88°C e 2,72 horas em variáveis não codificadas (-0,6167; 0,2076), alcançando 0,5888 g/cm³ massa específica anidra.

4.6 MOLHABILIDADE

A Tabela 31 apresenta os resultados experimentais e previstos pelo modelo para molhabilidade (ângulo de contato).

TABELA 31 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA MOLHABILIDADE (ÂNGULO DE CONTATO) DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	AR5s	$\widehat{AR5s}$	AR30s	$\widehat{AR30s}$	AT5s	$\widehat{AT5s}$	AT30s	$\widehat{AT30s}$
	(°C)	(H)	°	°	°	°	°	°	°	°
1	148,79	1,44	24,28	26,08	0,00	3,27	12,67	12,75	0,00	0,23
2	191,21	1,44	45,44	42,53	30,14	28,89	31,74	29,18	20,58	16,52
3	148,79	3,56	28,72	29,43	0,00	3,84	15,31	17,37	0,00	1,42
4	191,21	3,56	51,08	47,08	33,74	33,06	39,29	38,70	26,72	23,85
5	170	2,5	31,53	37,60	22,77	21,58	20,09	20,81	8,61	9,40
6	170	2,5	41,51	37,60	20,83	21,58	20,68	20,81	9,73	9,40
7	170	2,5	39,74	37,60	21,14	21,58	21,65	20,81	9,85	9,40
8	140	2,5	28,24	26,01	0,00	-4,49	15,28	13,66	0,00	-1,72
9	170	1	31,37	31,70	18,84	17,95	15,34	16,99	3,87	6,03
10	200	2,5	45,68	50,11	32,38	34,28	38,22	40,35	21,30	25,66
11	170	4	35,43	37,29	23,00	21,30	28,14	27,00	11,57	12,05
Testemunha	-	-	7,48		0,00		3,03		0,00	

FONTE: O autor (2020).

Onde:

T = temperatura (°C)

t = tempo (H)

AR5s = Ângulo de contato na face radial a 5 segundos (°)

AR30s = Ângulo de contato na face radial a 30 segundos (°)

AT5s = Ângulo de contato na face tangencial a 5 segundos (°)

AR30s = Ângulo de contato na face tangencial a 30 segundos (°)

^ = variáveis com o acento circunflexo são as previstas pelo modelo,

Níveis para a temperatura = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (140; 148,79; 170; 191,21;200) °C,

Níveis para o tempo = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (1; 1,44; 2,5; 3,56; 4) horas.

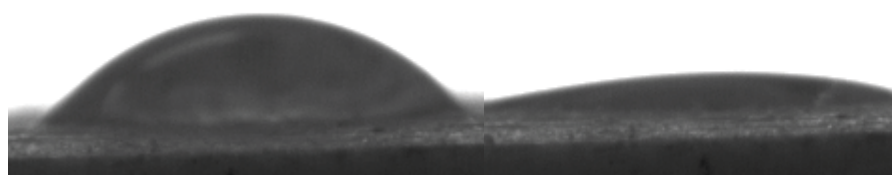
O ângulo de contato está associado a hidrofobicidade da superfície de madeira. É possível observar na tabela 31 que quando comparada a amostra testemunha, o aumento da temperatura e tempo de modificação térmica aumentaram o ângulo de contato. Outro fator predominante é a diminuição do ângulo em relação ao tempo em que a gota fica na superfície, no caso entre 5 e 30 segundos. Fato esse

também observado por Esteves et al. (2008), Cademartori (2012; Metsä-Kortelainen; (2012); Cademartori et al. (2015);); Carvalho (2019);Távora (2019); Kufre;Udoakpan (2019). Da mesma forma que o teor de umidade de equilíbrio, o aumento do ângulo de contato pode ser explicado pela cristalinização da celulose e plasticização da lignina, diminuindo os sítios hidroxílicos disponíveis (HOLMAN et al., 2000; MILITZ; TJEERDSMA, 2001; MARTON et al., 2003; TJEERDSMA; MILITZ, 2005; HAKKOU et al. 2005; PÉTRISSANS et al., 2005; BOONSTRA; TJEERSDMA, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009). Uma madeira mais hidrofóbica pode ser aplicada em ambientes sujeitos a maiores teores de umidade, aumentando a gama de utilização (KARTAL et al. 2007)

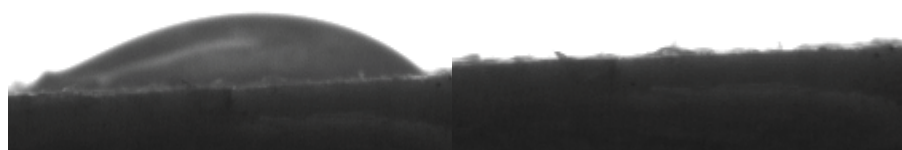
Também pode-se observar que os ângulos de contato na face radial são de maneira geral maiores que na face tangencial. Isso ocorre, porque na face tangencial estão expostos os topos dos raios, que facilitam a permeabilidade da água na madeira (SKAAR, 1972; JANKOWSKY; GALVÃO, 1985; BURGER; RICHTER, 1991; SIAU, 1995). A Figura 27 demonstra o comportamento das gotas perante a superfície.

FIGURA 27 – EXEMPLOS DOS ENSAIOS DE ÂNGULO DE GOTA E O SEU COMPORTAMENTO NAS FACES RADIAL E TANGENCIAL DA AMOSTRA TESTEMUNHA E O TRATAMENTO 10 (200°C E 2,5 HORAS)

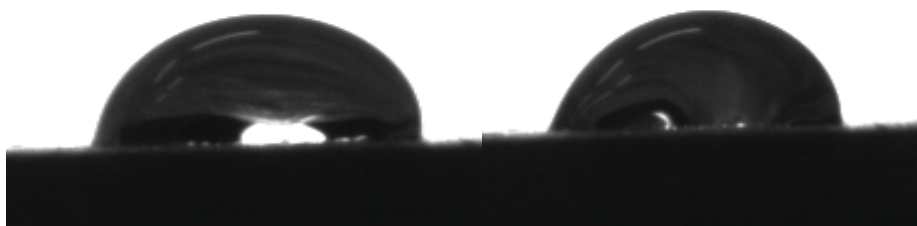
A



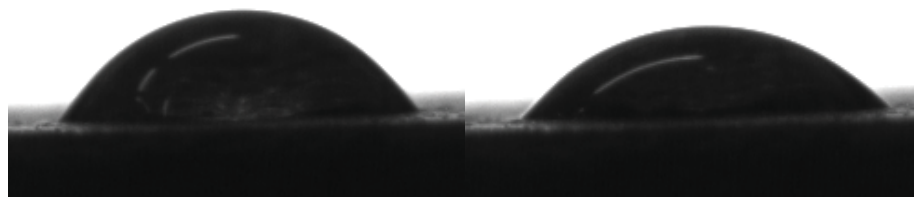
B



C



D



FONTE: O autor (2020).

Onde:

A = exemplo de ângulo de gota na face radial da amostra testemunha,

B = exemplo de ângulo de gota na face tangencial da amostra testemunha,

C = exemplo de ângulo de gota na face radial da amostra a 200 e 2,5 horas (tratamento 10),

D = exemplo de ângulo de gota na face tangencial da amostra a 200°C e 2,5 horas (tratamento 10).

Com os dados experimentais foi possível realizar uma ANOVA para cada parâmetro que estão representados na Tabela 32.

TABELA 32 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA MOLHABILIDADE E ÂNGULO DE CONTATO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab
AR5s	FSQR	5,555731	5,050329	1,100073
	FSQep	0,663878	19,16429	0,034641
	p-valor	0,0415*	R ²	0,847462
AR30s	FSQR	27,68943	5,050329	5,482698
	FSQep	16,88038	19,16429	0,880825
	p-valor	0,0012*	R ²	0,965144
AT5s	FSQR	36,93876	5,050329	7,314129

	FSQep	12,01449	19,16429	0,62692
	p-valor	0,0006*	R ²	0,973642
AT30s	FSQR	14,76655	5,050329	2,923878
	FSQep	38,43466	19,16429	2,005535
	p-valor	0,0051*	R ²	0,936575

Onde:

AR5s = Ângulo de contato na face radial a 5 segundos (°)

AR30s = Ângulo de contato na face radial a 30 segundos (°)

AT5s = Ângulo de contato na face tangencial a 5 segundos (°)

AR30s = Ângulo de contato na face tangencial a 30 segundos (°)

FSQR = valor de F para soma quadrática da regressão

FSQep = valor de F soma quadrática erro puro

R² = variação explicada

p-valor = para 95% de intervalo de confiança

* = significativo a 95% de intervalo de confiança.

ns = não significativo a 95% de intervalo de confiança.

Na tabela 32 fica evidente que todos os modelos foram significativos, com o F calculado da regressão maior que o F tabelado, e que não há falta de ajuste, com exceção do AT30s, que representa uma dificuldade de ajuste do modelo, mas não necessariamente o invalida. Outros dois parâmetros que contribuem para essa afirmação são os valores do p-valor abaixo de 0,05 e os R² elevados, sendo 0,85; 0,97; 0,97; 0,94, respectivamente. Os valores dos coeficientes encontrados para os modelos estão representados nas Tabelas 33, 34 e 35.

TABELA 33 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE RADIAL A 5S DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	37,5952	2,7476	13,683	0*
b1	8,52244	1,68255	5,06518	0,0039*
b2	1,9766	1,68255	1,17476	0,293
b11	0,232659	2,00264	0,116176	0,912
b22	-1,5479	2,00264	-0,772929	0,4745
b12	0,300278	2,37949	0,126194	0,9045

FONTE: O autor (2020).

TABELA 34 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE RADIAL A 30S DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	21,5782	1,95101	11,06	0,0001*
b1	13,709	1,19475	11,4744	0,0001*
b2	1,18503	1,19475	0,99187	0,3668
b11	-3,34058	1,42203	-2,34915	0,0656
b22	-0,97502	1,42203	-0,685652	0,5234
b12	0,899286	1,68963	0,532239	0,6174

FONTE: O autor (2020).

TABELA 35 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE TANGENCIAL A 5S DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	20,8057	1,25563	16,5699	0*
b1	9,43834	0,768916	12,2749	0,0001*
b2	3,53662	0,768916	4,59948	0,0058*
b11	3,09889	0,915193	3,38605	0,0195*
b22	0,594013	0,915193	0,649057	0,5449
b12	1,22514	1,08741	1,12666	0,311

FONTE: O autor (2020).

TABELA 36 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE TANGENCIAL A 30S DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	9,39921	1,90792	4,92641	0,0044
b1	9,67812	1,16836	8,28352	0,0004
b2	2,12896	1,16836	1,82218	0,128
b11	1,28595	1,39062	0,92473	0,3975
b22	-0,18071	1,39062	-0,129952	0,9017
b12	1,53556	1,65231	0,92934	0,3954

FONTE: O autor (2020).

Onde:

b0 = constante,

b1 = coeficiente linear de temperatura,

b2 = coeficiente linear de tempo,

b11 = coeficiente quadrático de temperatura,

b22 = coeficiente quadrático de tempo,

b12 = coeficiente de interação entre tempo e temperatura,

* = significativo em um intervalo de 95% de confiança.

Nas Tabelas 33, 34, 35 e 36 pode concluir que as variáveis b0 e b1 foram as mais significativas, em adicional, para o ângulo de contato na face tangencial a 5s, as variáveis b2 e b11 também foram significativas estatisticamente. Isso significa que para a molhabilidade a temperatura foi predominante em relação ao tempo e que possivelmente o tempo de uma hora foi o suficiente para alterar as propriedades supracitadas. A Equação 42, Equação 43, Equação 44 e Equação 45 representam os modelos gerados.

$$\widehat{AR5s} = (37,5952) + (8,52244)T_1 + (1,9766)t_2 + (0,2327)T_1^2 - (1,5479)t_2^2 + (0,3003)T_1t_2 \quad \text{Equação 42}$$

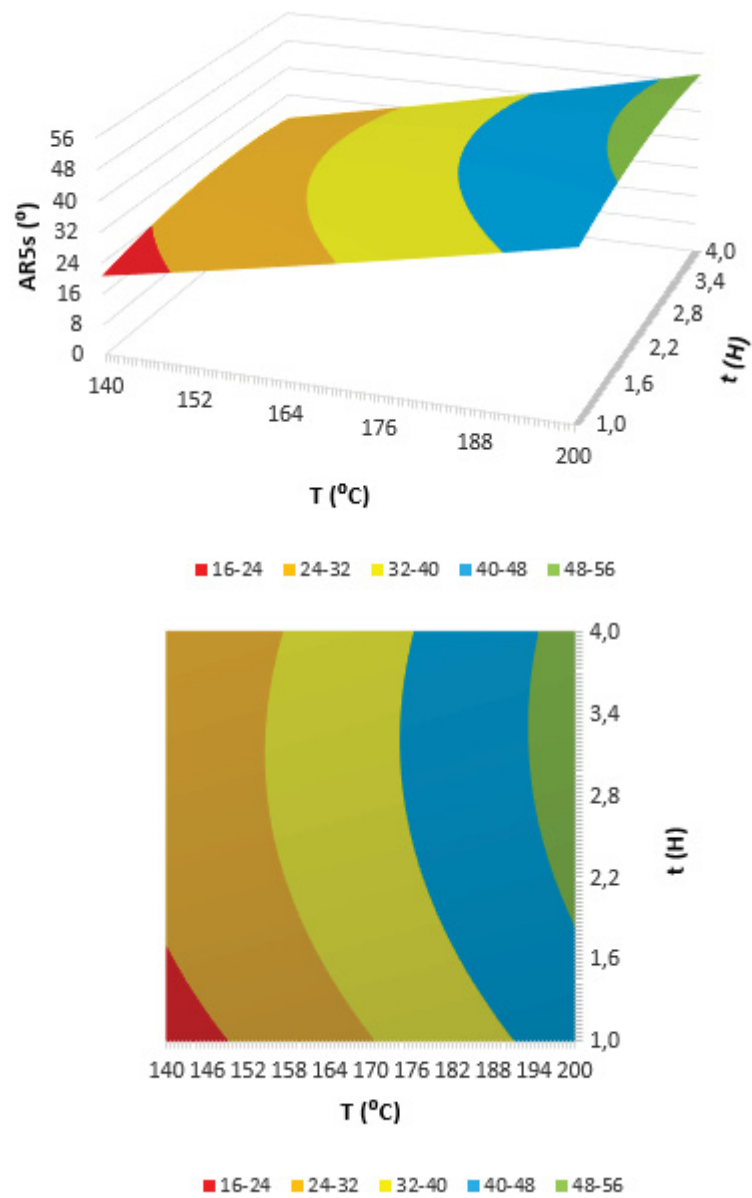
$$\widehat{AR30s} = (21,5782) + (13,709)T_1 + (1,1850)t_2 - (3,3406)T_1^2 - (0,9750)t_2^2 + (0,8993)T_1t_2 \quad \text{Equação 43}$$

$$\widehat{AT5s} = (20,8057) + (9,43834)T_1 + (3,09889)t_2 + (0,5940)T_1^2 + (0,5940)t_2^2 + (1,2251)T_1t_2 \quad \text{Equação 44}$$

$$\widehat{AT30s} = (9,39921) + (9,6781)T_1 + (2,1290)t_2 + (1,28595)T_1^2 - (0,1807)t_2^2 + (1,5356)T_1t_2 \quad \text{Equação 45}$$

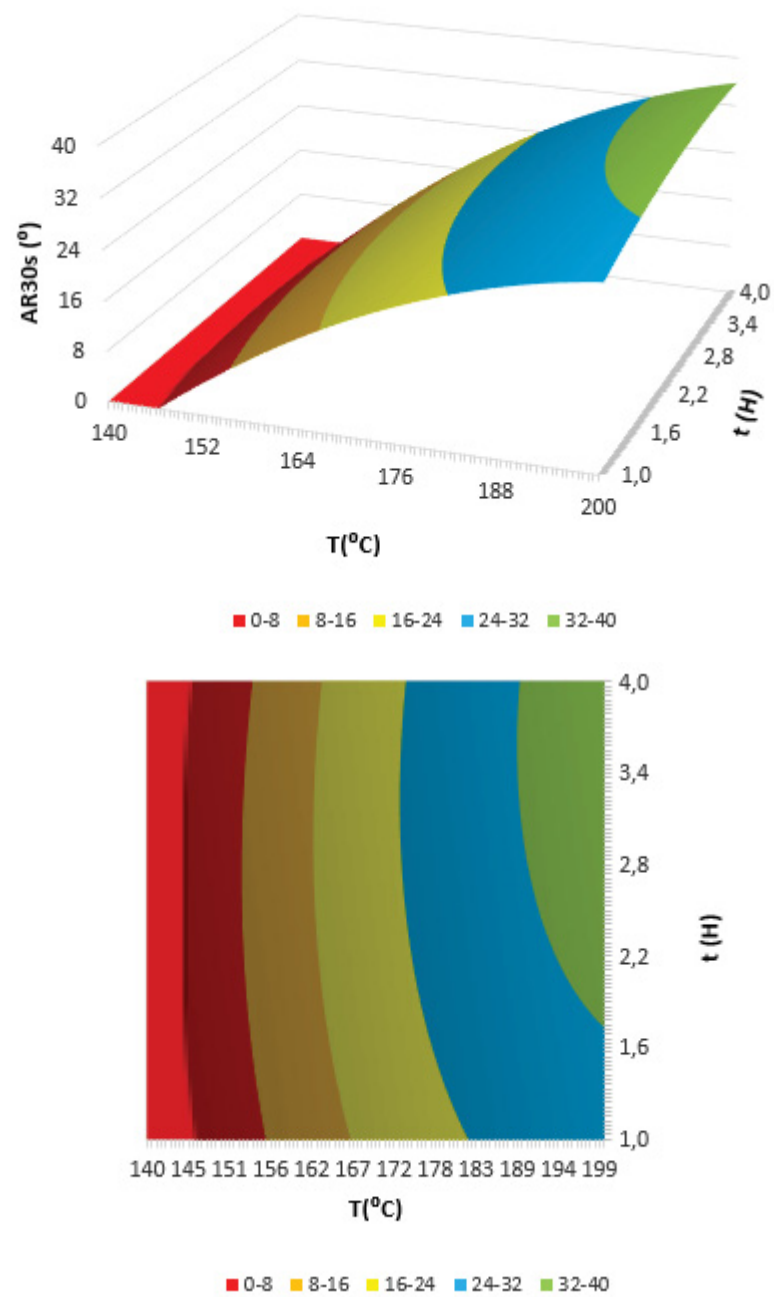
Com os modelos quadráticos significativos gerados para os ângulos de contato foram possíveis criar os gráficos de metodologia de superfície de resposta e as curvas de nível (Figura 28, 29, 30 e 31) para facilitar a visualização com comportamento da equação.

FIGURA 28 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE RADIAL EM 5 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



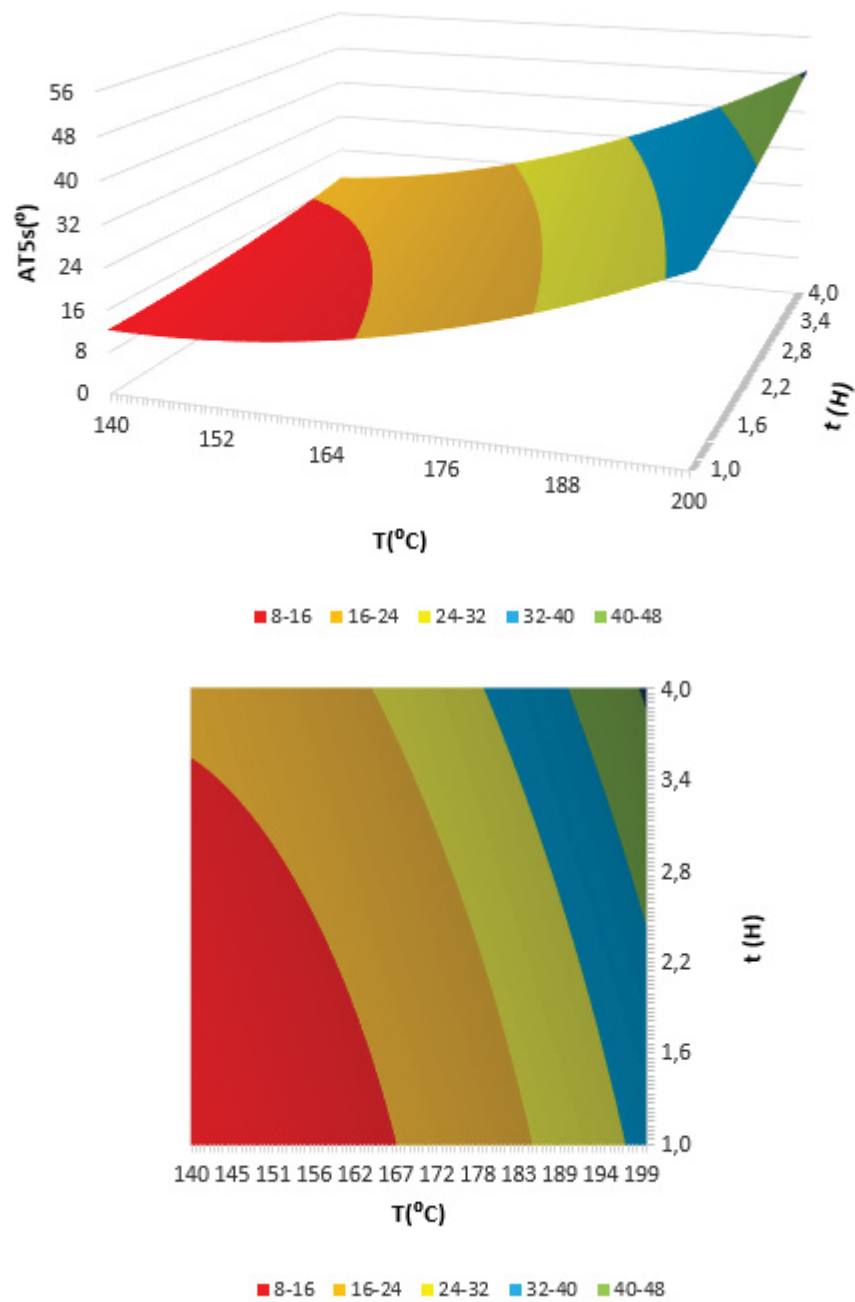
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 29 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE RADIAL EM 30 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



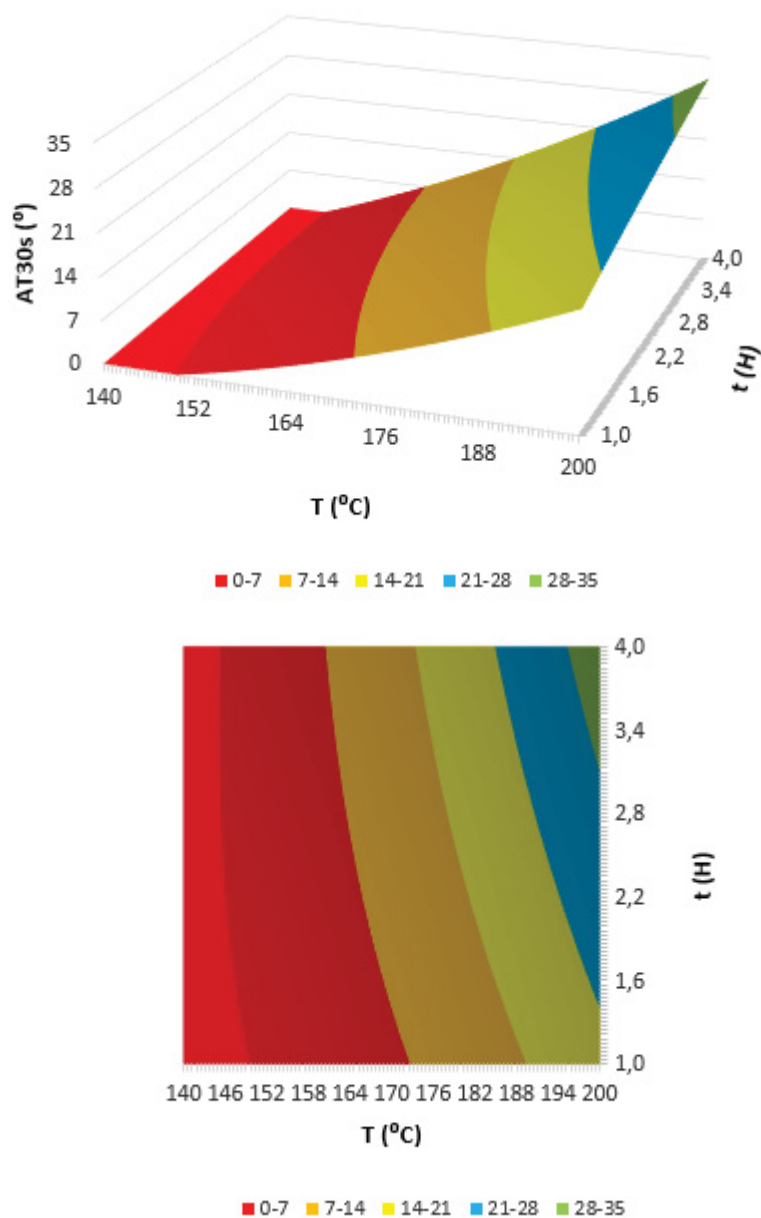
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 30 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE TANGENCIAL EM 5 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 31 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE TANGENCIAL EM 30 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

As Figuras 28, 29,30 e 31 representam o comportamento do ângulo de contato com o aumento da temperatura e tempo de modificação térmica. Fica ainda mais evidente a melhora na hidrofobicidade em temperaturas mais elevadas. Os gráficos demonstram que próximo a 200°C e 4 horas de exposição o ângulo alcançam um pico de previsão, que geralmente é considerado como uma melhora para utilização em um produto final.

A análise do ângulo de contato, alinhado a perda de massa, teor de umidade de equilíbrio e coeficientes de inchamento, contribuem para a afirmação que há uma melhora na estabilidade dimensional da madeira. Como não há um ponto de máximo

ou mínimo visto graficamente, não é indicado calcular um ponto ótimo (ponto crítico). Considerando apenas os coeficientes significativos é possível recalculer os modelos, que estão disponíveis no Apêndice 4.

4.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A Tabela 37 apresenta os resultados experimentais e previstos pelo modelo para a flexão estática (Flexão perpendicular às fibras), compressão paralela as fibras e dureza janka.

TABELA 37 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA, COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS E DUREZA JANKA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Trat	T (°C)	t (H)	FE MPa	\widehat{FE} MPa	FMOE MPa	\widehat{FMOE} MPa	CP MPa	\widehat{CP} MPa	CMOE MPa	\widehat{CMOE} MPa	DJ MPa	\widehat{DJ} MPa
1	148,79	1,44	86,03	84,16	10287	10412	51,92	51,78	5468	5210	32,89	30,86
2	191,21	1,44	71,57	73,78	9096	9275	45,59	46,25	4687	4436	26,67	25,30
3	148,79	3,56	83,72	82,67	10482	10591	51,86	51,87	5003	5186	31,45	31,75
4	191,21	3,56	65,21	68,23	8438	8602	40,26	41,06	3808	4000	22,36	23,32
5	170	2,5	84,80	84,97	10611	10280	46,26	50,11	5478	5405	29,54	29,33
6	170	2,5	86,38	84,97	10225	10280	53,66	50,11	5461	5405	30,54	29,33
7	170	2,5	83,74	84,97	10005	10280	50,40	50,11	5278	5405	27,92	29,33
8	140	2,5	80,43	82,72	10374	10268	52,01	52,24	5438	5478	32,61	33,61
9	170	1	82,97	82,96	10607	10452	51,05	50,82	4448	4794	25,15	27,34
10	200	2,5	68,63	65,17	8241	8057	41,58	40,69	4064	4092	23,66	23,72
11	170	4	79,14	77,98	10238	10103	47,66	47,22	4747	4469	27,68	26,56
Test	-	-	87,2		12081		56,64		5480		34,89	

FONTE: O autor (2020).

Onde:

T = Temperatura (°C)

t = Tempo (horas)

FE = Flexão estática (MPa)

FMOE = Módulo de elasticidade da flexão estática (MPa)

CP = Compressão paralela as fibras (MPa)

CMOE = Módulo de elasticidade da compressão paralela as fibras (MPa)

DJ = Dureza Janka (MPa)

Trat = Tratamento

Test = Testemunha

^ = Variáveis com o acento circunflexo são as previstas pelo modelo,

Níveis para a temperatura = Variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); Variáveis não codificadas (140; 148,79; 170; 191,21;200) °C,

Níveis para o tempo = Variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); Variáveis não codificadas (1; 1,44; 2,5; 3,56; 4) horas.

De uma maneira geral as propriedades mecânicas tenderam a diminuir a medida que a temperatura e o tempo de modificação térmica aumentaram, em especial em temperaturas próximas a 200°C. No que diz respeito a flexão estática, os resultados estão de acordo com: Boonstra et al. (2007); Esteves et al. (2007); Korkut et al. (2007); Calonego (2009); Modes (2010); Lengowski (2011); Batista (2012); Cademartori (2012); Calonego et al. (2012) e Távora (2019); No caso da compressão paralela as fibras estão na mesma linha de comportamento de: Korkut et al. (2007); Modes (2010) e Batista (2012); e por fim, para a dureza janka: Korkut et al (2007); Calonego (2009); Modes (2010); Lengowski (2011) e Batista (2012).

Esse fato é conhecido na literatura e está diretamente correlacionado com a degradação dos componentes químicos da madeira, tornando-se o ponto fraco da modificação térmica (ESTEVES; PEREIRA, 2009). Essas alterações podem ser consideradas permanentes, tornando a madeira menos rígida, contrapondo as vantagens da modificação térmica (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003; BATISTA, 2012). No mesmo sentido, Mburu et al. (2008), concluíram que a diminuição da resistência mecânica é diretamente proporcional a perda de massa e como essa teve significativa redução, pode-se concluir que foi um dos fatores principais para explicar esses resultados.

A degradação especialmente das hemiceluloses é ressaltada por Boonstra et al. (2006) como um dos principais motivos para diminuir algumas propriedades mecânicas. França (2019), relatou a degradação da parede celular, relacionada com o aumento da temperatura do tratamento térmico da madeira. Awoyemi e Jones (2011), descreveram uma destruição parcial e progressiva, da parede celular e de traqueóides com o aumento do tempo de exposição a temperaturas elevadas. Com os dados experimentais coletados foi possível fazer uma análise de regressão e os parâmetros da ANOVA estão dispostos na Tabela 38.

TABELA 38 –ANOVA SIMPLIFICADA PARA A FLEXÃO ESTÁTICA, COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS E DUREZA JANKA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab
FE	FSQR	12,56532	5,050329	2,48802
	FSQep	7,013348	19,16429	0,365959
	p-valor	0,0073*	R ²	0,926283
FMOE	FSQR	19,68626	5,050329	3,898014
	FSQep	0,616693	19,16429	0,032179
	p-valor	0,0026*	R ²	0,951659
CP	FSQR	5,793821	5,050329	1,147217
	FSQep	0,053241	19,16429	0,002778
	p-valor	0,0382*	R ²	0,852807
CMOE	FSQR	7,442527	5,050329	1,473672
	FSQep	10,82567	19,16429	0,564888
	p-valor	0,023*	R ²	0,881552
DJ	FSQR	6,185862	5,050329	1,224843
	FSQep	2,68977	19,16429	0,140353
	p-valor	0,0336*	R ²	0,860838

Onde:

FE = Flexão estática (Mpa)

FMOE = Módulo de elasticidade da flexão estática (Mpa)

CP = Compressão paralela as fibras (Mpa)

CMOE = Módulo de elasticidade da compressão paralela as fibras (Mpa)

DJ = Dureza Janka (Mpa)

FSQR = valor de F para soma quadrática da regressão

FSQep = valor de F soma quadrática erro puro

R² = variação explicada

p-valor = para 95% de intervalo de confiança

* = significativo a 95% de intervalo de confiança.

ns = não significativo a 95% de intervalo de confiança.

É possível observar na Tabela 38 que todos os parâmetros estatísticos foram significativos, tendo um p-valor abaixo de 0,05, com o Fcalculado da regressão maior que o Ftabelado, e não havendo falta de ajuste. Também é interessante observar que o R² foi mais elevado para a flexão estática, com valores de 0,93 e 0,96. Isso pode ser

explicado, pois a flexão está mais relacionada a hemicelulose, que sofre perdas maiores que a lignina e celulose, as quais estão mais ligadas as propriedades de compressão e rigidez (HILL, 2006; ESTEVES et al., 2007; KOCAEFE et al., 2008; ESTEVES; PEREIRA, 2009). Dessa forma, um modelo quadrático significativo pode ser gerado a partir desses parâmetros como pode ser observado nas Tabelas 39, 40, 41, 42 e 43.

TABELA 39 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE RUPTURA) DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	84,9667	1,64224	51,7384	0*
b1	-6,19847	1,00566	-6,16358	0,0016*
b2	-1,77693	1,00566	-1,76693	0,1375
b11	-5,52083	1,19698	-4,61232	0,0058*
b22	-2,24583	1,19698	-1,87626	0,1194
b12	-1,025	1,42222	-0,720705	0,5034

FONTE: O autor (2020).

TABELA 40 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	10280,1	155,224	66,2279	0*
b1	-781,437	95,0546	-8,22092	0,0004
b2	-123,319	95,0546	-1,29735	0,2511
b11	-558,779	113,138	-4,93893	0,0043*
b22	-1,22917	113,138	-0,0108643	0,9918
b12	-213,1	134,428	-1,58524	0,1738

FONTE: O autor (2020).

TABELA 41 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE RUPTURA) DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	50,1067	1,40732	35,6042	0*
b1	-4,08503	0,861806	-4,74008	0,0051*
b2	-1,27302	0,861806	-1,47716	0,1997
b11	-1,82271	1,02575	-1,77694	0,1357
b22	-0,54271	1,02575	-0,529082	0,6194
b12	-1,3175	1,21878	-1,081	0,3291

FONTE: O autor (2020).

TABELA 42 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	5405,36	168,073	32,1608	0*
b1	-489,955	102,923	-4,76039	0,0051*
b2	-115,124	102,923	-1,11854	0,3142
b11	-310,35	122,503	-2,5334	0,0523
b22	-386,997	122,503	-3,15908	0,0251*
b12	-103	145,556	-7,10E-01	0,5096

FONTE: O autor (2020).

TABELA 43 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE DUREZA JANKA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	29,3316	1,08137	27,1245	0*
b1	-3,49697	0,6622	-5,28084	0,0032*
b2	-0,27319	0,6622	-0,412542	0,697
b11	-0,33184	0,788175	-0,421028	0,6912
b22	-1,19	0,788175	-1,51E+00	0,1913
b12	-0,71881	0,936492	-0,767552	0,4774

FONTE: O autor (2020).

Onde:

b0 = constante,

b1 = coeficiente linear de temperatura,

b2 = coeficiente linear de tempo,

b11 = coeficiente quadrático de temperatura,

b22 = coeficiente quadrático de tempo,

b12 = coeficiente de interação entre tempo e temperatura,

* = significativo em um intervalo de 95% de confiança.

Para os módulos de ruptura da flexão estática e compressão paralelas as fibras, bem como, para a dureza Janka, apenas os coeficientes b0 e b1 foram significativos, demonstrando que para as propriedades mecânicas plásticas a temperatura foi a principal variável de entrada. Contudo, para os módulos de elasticidade da flexão estática e compressão paralela as fibras, além do b0 e b1, o coeficientes b11 também influenciou, admitindo que pode haver um comportamento

quadrático de curvatura. Em nenhuma propriedade mecânica houve interação entre a temperatura e o tempo. As Equações 46, 47, 48, 49 e 50 apresentam os modelos gerados.

$$\widehat{FE} = (84,9667) - (6,1984)T_1 - (1,7769)t_2 - (5,5208)T_1^2 - (2,2458)t_2^2 - (1,025)T_1t_2 \quad \text{Equação 46}$$

$$\widehat{FMOE} = (10280,1) - (781,44)T_1 - (123,32)t_2 - (558,78)T_1^2 - (1,2292)t_2^2 - (213,1)T_1t_2 \quad \text{Equação 47}$$

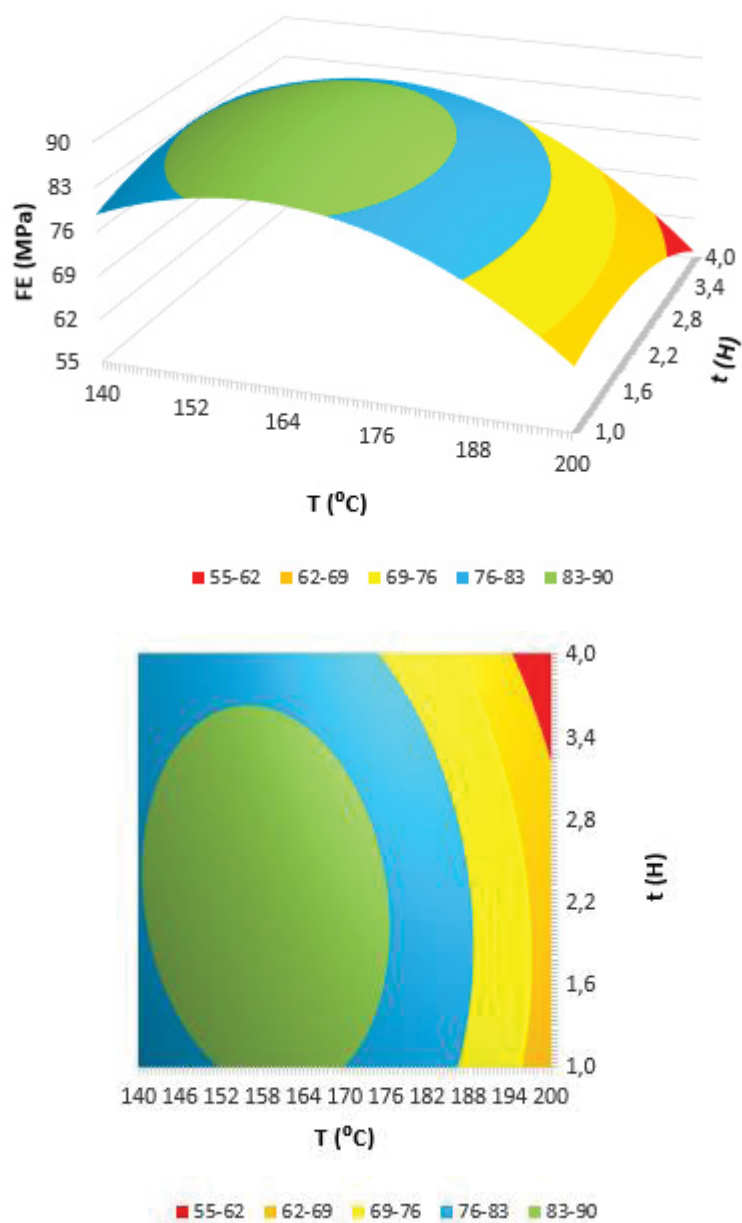
$$\widehat{CP} = (50,1067) - (4,0850)T_1 - (1,2730)t_2 - (1,8227)T_1^2 - (0,5427)t_2^2 - (1,3175)T_1t_2 \quad \text{Equação 48}$$

$$\widehat{CMOE} = (5405,36) - (489,96)T_1 - (115,12)t_2 - (310,35)T_1^2 - (387,00)t_2^2 - (103,0)T_1t_2 \quad \text{Equação 49}$$

$$\widehat{DJ} = (29,3316) - (3,4970)T_1 - (0,2732)t_2 - (0,3318)T_1^2 - (1,19)t_2^2 - (0,7188)T_1t_2 \quad \text{Equação 50}$$

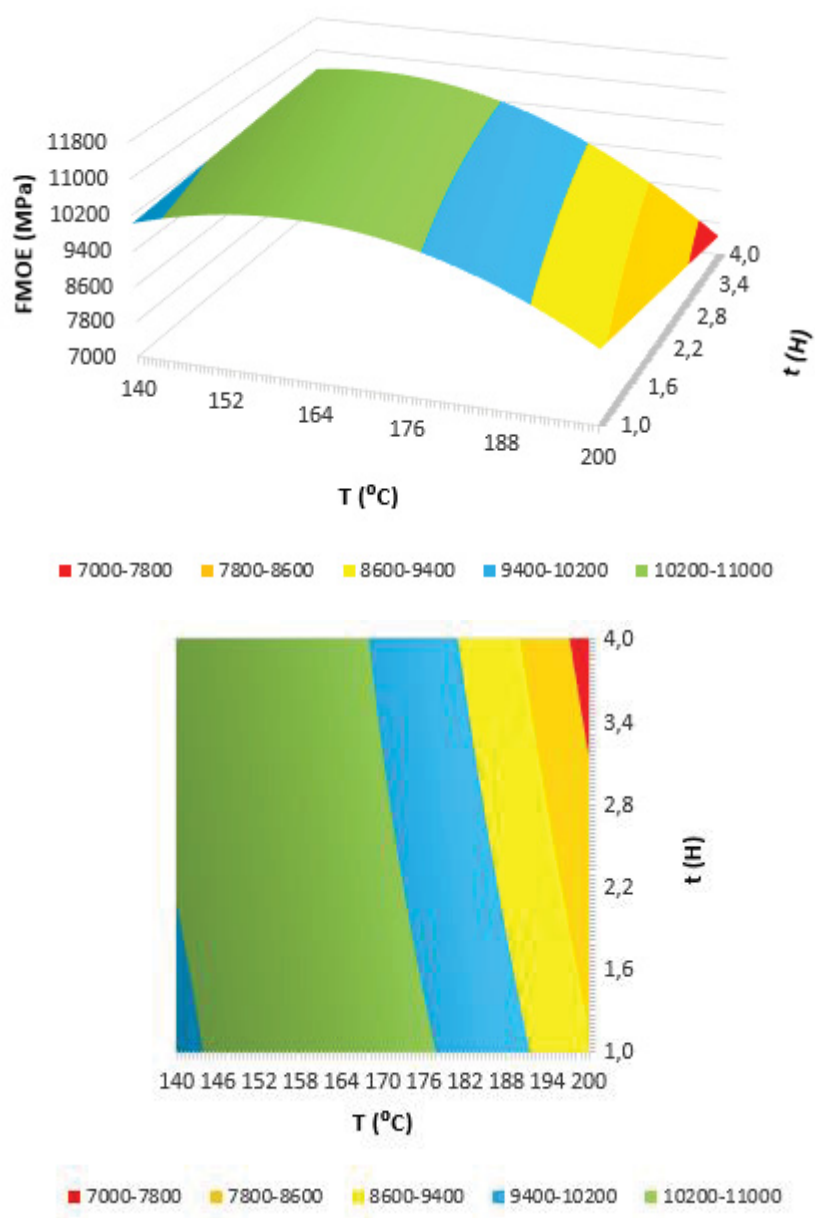
Com os modelos quadráticos significativos gerados para as propriedades mecânicas foram possíveis criar os gráficos de metodologia de superfície de resposta e as curvas de nível (Figuras 32, 33, 34, 35 e 36) para facilitar a visualização com comportamento da equação.

FIGURA 32 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE RUPTURA) DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



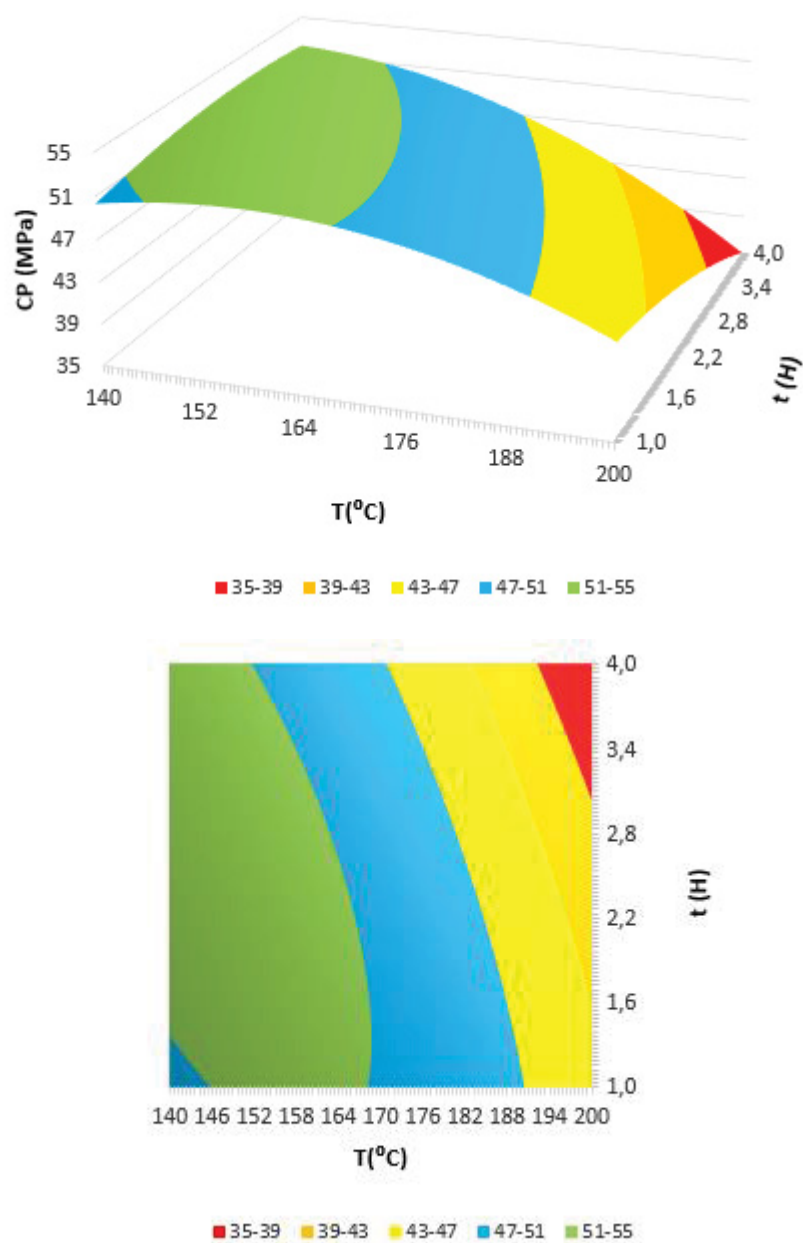
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 33 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



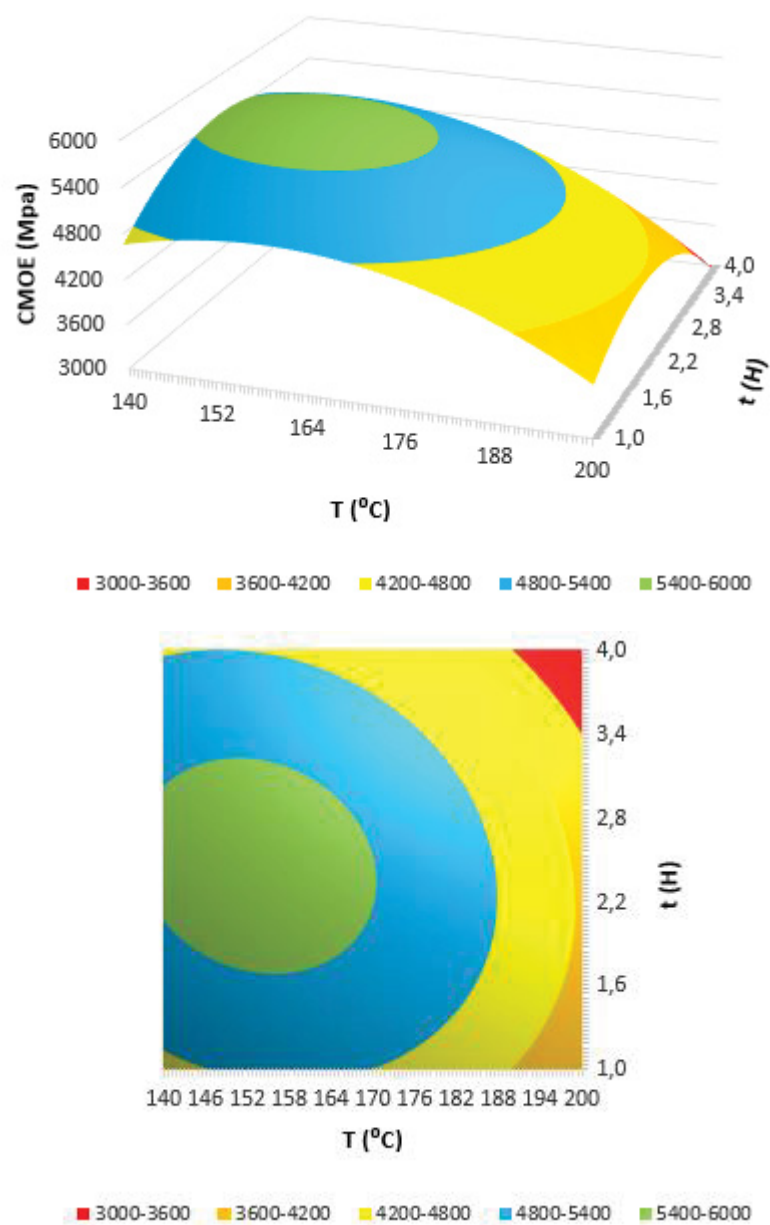
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 34 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE RUPTURA) DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



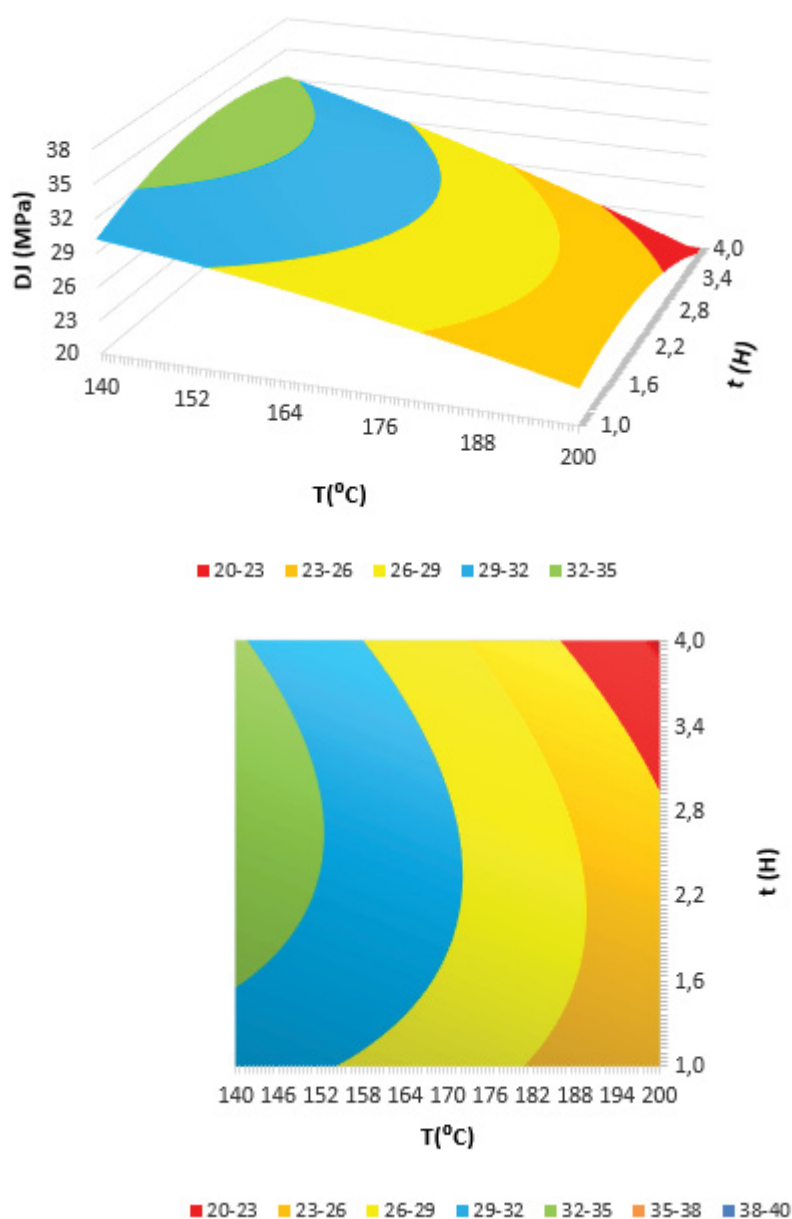
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 35 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 36 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A DUREZA JANKA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

As Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 ilustram que embora haja uma tendência de decréscimo nessas propriedades, em algumas faixas de temperatura e tempo houve um ligeiro aumento. Bhuiyan et al. (2001) e Wikberg e Maunu (2004) explicam que esse comportamento pode estar ligado ao rearranjo ou reticulação dos componentes químicos e um provável aumento na proporção de cristalinidade da celulose e a consequente aproximação das micelas. No entanto, o mesmo não ocorreu para a dureza Janka, que segundo a Figura 36, teve um decréscimo mais pronunciado. Considerando apenas os coeficientes significativos é possível recalculer o modelo de

perda de massa e de teor de umidade de equilíbrio. Os modelos recalculados estão disponíveis nos no Apêndice 4.

As propriedades mecânicas são importantíssimas para a aplicação comercial e destinação final de um produto. Dessa forma, encontrar faixas ótimas ou planejar a modificação térmica com base nas propriedades necessárias são de fundamental importância. Os gráficos de superfície de resposta facilitam o delineamento de uma produção. Nesse sentido, o uso das derivadas parciais para se encontrar os pontos ótimos são essenciais. A Equação 51 e Equação 52 apresentam as derivadas parciais da flexão estática, após isso, resolvendo o sistema de duas variáveis são encontrados os pontos ótimos.

$$\frac{\partial \widehat{FE}}{\partial T_1} = (-6,1984) - (11,0416)T_1 - (1,025)t_2 = 0 \quad \text{Equação 51}$$

$$\frac{\partial \widehat{FE}}{\partial t_2} = (-1,7769) - (4,4916)t_2 - (1,025)T_1 = 0 \quad \text{Equação 52}$$

Para a flexão estática as variáveis não codificadas ótimas são 158,60 °C e 2,21 horas (-0,536; -0,27329), ocasionando um valor máximo de 86,87 MPa. O mesmo processo pode ser realizado para o módulo de elasticidade como observado na Equação 53 e Equação 54.

$$\frac{\partial \widehat{FMOE}}{\partial T_1} = (-781,44) - (1117,56)T_1 - (213,1)t_2 = 0 \quad \text{Equação 53}$$

$$\frac{\partial \widehat{FMOE}}{\partial t_2} = (-123,32) - (2,4584)t_2 - (213,1)T_1 = 0 \quad \text{Equação 54}$$

Para o módulo de elasticidade da flexão estática as variáveis não codificadas ótimas são 157,85 °C e 1,78 horas (-0,57093; - 0,67287), ocasionando um valor máximo de 10551,13 MPa. O mesmo processo pode ser realizado para a compressão paralela a fibras como observado na Equação 55 e Equação 56.

$$\frac{\partial \widehat{CP}}{\partial T_1} = (-4,0850) - (3,6454)T_1 - (1,3175)t_2 = 0 \quad \text{Equação 55}$$

$$\frac{\partial \widehat{CP}}{\partial t_2} = (-1,2730) - (1,0854)t_2 - (1,3175)T_1 = 0 \quad \text{Equação 56}$$

Para a compressão paralela as fibras as variáveis não codificadas ótimas são 143,59 °C e 2,86 horas (-1,24124; 0,333824), ocasionando um valor máximo de 52,43 MPa. O mesmo processo pode ser realizado para o módulo de elasticidade da compressão paralela a fibras como observado na Equação 57 e Equação 58.

$$\frac{\partial \widehat{CMOE}}{\partial T_1} = (-489,96) - (620,7)T_1 - (103,0)t_2 = 0 \quad \text{Equação 57}$$

$$\frac{\partial \widehat{FMOE}}{\partial t_2} = (-115,12) - (774,0)t_2 - (103,0)T_1 = 0 \quad \text{Equação 58}$$

Para o módulo de elasticidade da compressão paralela as fibras as variáveis não codificadas ótimas são 153,36 °C e 2,45 horas (-0,78195; -0,04468), ocasionando um valor máximo de 5562,10 MPa.

4.8 PROPRIEDADES COLORÍMETRICAS

A Tabela 44 apresenta os resultados experimentais e previstos pelo modelo para os parâmetros colorimétricos.

TABELA 44 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA COLORIMETRIA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Trat	T (°C)	t (H)	L*	\widehat{L}^*	a*	\widehat{a}^*	b*	\widehat{b}^*	C*	\widehat{C}^*	h*	\widehat{h}^*
1	148,79	1,44	76,72	74,90	6,18	6,32	25,32	25,95	26,07	26,72	76,29	76,29
2	191,21	1,44	44,77	47,75	9,39	8,99	20,70	21,86	22,73	23,67	65,61	67,25
3	148,79	3,56	74,89	73,82	6,77	6,71	25,46	26,24	26,35	27,03	75,11	76,00
4	191,21	3,56	41,70	45,44	9,96	9,36	18,44	19,74	20,95	21,93	61,63	64,16
5	170	2,5	67,80	64,84	7,12	7,39	26,62	28,00	27,56	28,96	75,02	75,21
6	170	2,5	64,41	64,84	7,77	7,39	27,35	28,00	30,36	28,96	75,17	75,21

7	170	2,5	62,32	64,84	7,28	7,39	28,04	28,00	28,97	28,96	75,44	75,21
8	140	2,5	75,32	77,76	6,17	6,03	25,53	24,94	26,27	25,66	76,41	76,30
9	170	1	64,45	64,03	7,42	7,51	27,22	26,35	28,21	27,41	74,76	74,12
10	200	2,5	42,84	38,49	9,18	9,79	18,79	17,45	20,91	19,89	63,96	61,53
11	170	4	63,13	61,64	7,68	8,05	26,13	25,06	27,23	26,40	73,63	71,73
Test	-	-	76,08		5,92		25,62		26,30		76,99	
Trat	T	t	ΔE	$\hat{\Delta} E$	Classificação							
	(°C)	(H)			Camargos e Gonzalez (2001)							
1	148,79	1,44	0,75	2,09	Branco							
2	191,21	1,44	31,89	28,75	Oliva							
3	148,79	3,56	1,47	2,21	Branco							
4	191,21	3,56	35,35	31,60	Oliva							
5	170	2,5	8,43	11,62	Oliva-amarelado							
6	170	2,5	12,40	11,62	Oliva-amarelado							
7	170	2,5	14,04	11,62	Oliva-amarelado							
8	140	2,5	0,81	-1,15	Branco							
9	170	1	11,84	12,61	Oliva-amarelado							
10	200	2,5	34,10	38,48	Oliva							
11	170	4	13,08	14,72	Oliva-amarelado							
Test	-	-	0,00		Branco							

FONTE: O autor (2020).

Onde:

T = temperatura (°C)

t = tempo (H)

L* = Luminosidade ou coordenada de cor branco-preto

a* = coordenada de cor vermelho-verde

b* = coordenada de cor amarelo-azul

C* = saturação de cor

h* = ângulo de tinta

ΔE = diferença de cor

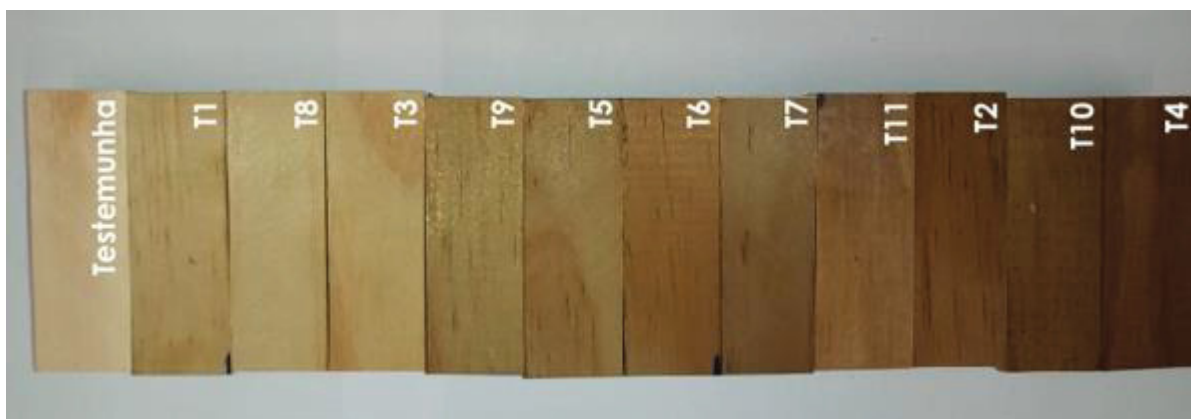
$\hat{\Delta} E$ = variáveis com o acento circunflexo são as previstas pelo modelo,

Níveis para a temperatura = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (140; 148,79; 170; 191,21; 200) °C,

Níveis para o tempo = variáveis codificadas (-1,41; -1; 0; 1; 1,41); variáveis não codificadas (1; 1,44; 2,5; 3,56; 4) horas.

Na Tabela 44 é notório que todos os parâmetros colorimétricos, com exceção da coordenada a^* e do ΔE , decrescem com o aumento da temperatura e tempo de exposição, quando comparados a amostra testemunha. O que corrobora com Conte et al. (2014); Poubel et al. (2015) e Schultz et al. (2020) que trabalharam com o gênero *Pinus*, e com Cademartori (2012); Griebeller (2013); Paula (2016); Calonego (2017) e França (2019), que trabalharam com outras espécies. O parâmetro colorimétrico L indica a claridade da amostra (0-preto; 100-branco), ou seja, a diminuição indica que a peça escurece com a modificação térmica. Aplicando a classificação de Camargos e Gonzalez (2001), é possível perceber que a amostra testemunha, bem como, as que foram tratadas em temperaturas próximas a 140°C, foram consideradas brancas. As peças tratadas a 170°C foram classificadas como oliva-amarelado e em temperaturas próximas a 200°C, oliva. Esse fator evidencia ainda mais o escurecimento das amostras em relação ao tratamento térmico. Conte et al. (2014) em um tratamento a 130°C, classificou uma madeira de *Pinus elliottii* segundo Camargos e Gonzalez (2001) como branca, assim como nesse estudo. Guerra (2015) em uma madeira de *Pinus caribaea* modificada termicamente, encontrou a cor oliva. A Figura 37 demonstra as cores das amostras após a modificação térmica.

FIGURA 37 – INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COR DAS AMOSTRAS DE *Pinus taeda* L.



FONTE: O autor (2020).

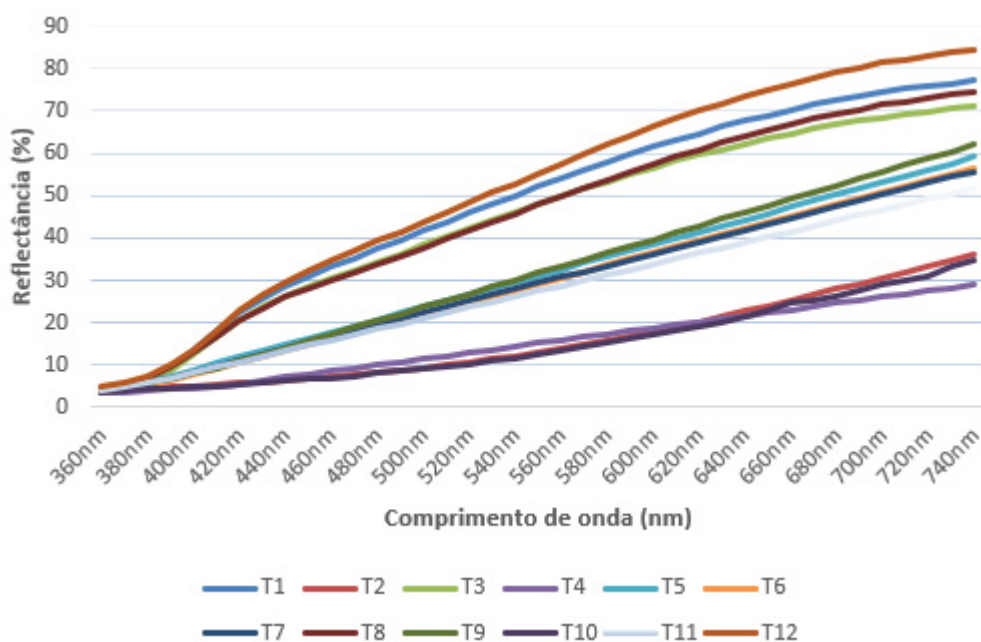
Sundqvist (2004) relata que dentro de um intervalo de 150 e 250°C, e dependendo do tempo, as propriedades colorimétricas da madeira podem ser fortemente alteradas, ao ponto de a madeira modificada termicamente ser um material aparentemente distinto, mudando seu estado natural. Poubel et al. (2011), em um

estudo com *Pinus caribaea* correlacionou a coordenada L^* com o teor de holocelulose e α -celulose, afirmando que esse escurecimento está diretamente ligado a degradação desses polissacarídeos.

A alteração da cor pode estar ligada a reações hidrolíticas que formam grupos cromóforos. Sendo que isso acontece por uma combinação de fatores, como a volatilização, oxidação ou migração dos extrativos para a superfície, bem como, as novas substâncias extraíveis criadas com a degradação principalmente das hemiceluloses, dos grupos fenólicos e o relativo aumento na proporção de lignina (THEANDER et al., 1993, MCDONALD et al., 1997; TJEERDSMA et al., 1998; BURTIN et al., 2000; MITSUI et al., 2001; BEKHTA; NIEMZ, 2003; SUNDQVIST; MORÉN, 2002 ; SUNDQVIST, 2004; AHAJJI et al., 2009; ESTEVES et al., 2008; AKYILDIZ et al., 2009). A alteração na cor pode ser um ponto positivo na utilização do material, agregando valor ao produto.

Para Cademartori et al. (2013), a redução da saturação (C), evidencia cores mais cinzas, ou torna a as cores mais impuras. Hikita et al. (2001) estabeleceram uma tabela para evidenciar a diferenciação de cor ΔE com cinco classificações, em que varia entre 0 e 0,5; 0,5 e 1,5; 1,5 e 3,0; 3,0 e 6,0, e por fim, 6,0 e 12, como: desprezível, ligeiramente perceptível, notável, apreciável e altamente apreciável, respectivamente. Observa-se que segunda essa mesma classificação as amostras com tratamentos próximos a 140°C são consideradas ligeiramente perceptível, enquanto o restante extrapola a classificação para muito apreciável, reafirmando a diferença visual entre as amostras. A Figura 38 evidencia a reflectância das amostras dentro do espectro da luz visível.

FIGURA 38 – GRÁFICO DE REFLECTÂNCIA x COMPRIMENTO DE ONDA PARA O ESPECTRO DA LUZ VISÍVEL



FONTE: O autor (2020).

É notável a diferenciação nos tratamentos T2, T4 e T10, que são próximos a 200°C, T1, T3 e T8 que são os próximos a 140°C para com os intermediários, T5, T6, T7, T9 e T11 que estão em 170°C. Corroborando tanto com a classificação de cores descritas, quanto com os resultados médios dos parâmetros de cor.

Com os dados experimentais foi possível realizar uma ANOVA para cada parâmetro de cor que estão representados nas Tabelas 45, 46, 47, 48, 49 e 50.

TABELA 45 – ANOVA SIMPLIFICADA PARA OS PARÂMETROS DE COR DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Propriedade	Parâmetro	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab
L*	FSQR	23,07729	5,050329	4,569462
	FSQep	2,376477	19,16429	0,124005
	p-valor	0,0018*	R ²	0,958467
a*	FSQR	11,40446	5,050329	2,258162
	FSQep	3,154053	19,16429	0,16458
	p-valor	0,0081	R ²	0,919384
b*	FSQR	10,55606	5,050329	2,090172
	FSQep	1,451938	19,16429	0,075763
	p-valor	0,011	R ²	0,913465
C*	FSQR	9,493511	5,050329	1,879781
	FSQep	0,933233	19,16429	0,048696
	p-valor	0,0137	R ²	0,904703
h*	FSQR	14,18708	5,050329	2,80914

	FSQep	143,7464	19,16429	7,500743
	p-valor	0,0056	R ²	0,934155
ΔE^*	FSQR	23,78759	5,050329	4,710106
	FSQep	2,106821	19,16429	0,109935
	p-valor	0,0017	R ²	0,959657

Onde:

L* = Luminosidade ou coordenada de cor branco-preto

a* = coordenada de cor vermelho-verde

b* = coordenada de cor amarelo-azul

C* = saturação de cor

h* = ângulo de tinta

ΔE = diferença de cor

FSQR = valor de F para soma quadrática da regressão

FSQep = valor de F soma quadrática erro puro

R² = variação explicada

p-valor = para 95% de intervalo de confiança

* = significativo a 95% de intervalo de confiança.

^{ns} = não significativo a 95% de intervalo de confiança.

Nas Tabela 45 fica evidente que todos os modelos foram significativos, com o F calculado da regressão maior que o F tabelado, e que não há falta de ajuste. Outros dois parâmetros que contribuem para essa afirmação são os valores do p-valor abaixo de 0,05 e os R² elevados, sendo para L*, a*, b*, C*, h* e ΔE , 0,96; 0,92; 0,91; 0,90; 0,93; 0,96, respectivamente. Os valores dos coeficientes encontrados para os modelos estão representados nas Tabelas 46, 47, 48, 49, 50 e 51.

TABELA 46 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	64,8437	2,15797	30,0485	0*
b1	-13,8839	1,32148	-10,5063	0,0001*
b2	-0,84432	1,32148	-0,638922	0,551
b11	-3,36	1,57288	-2,14	0,0856
b22	-1,00518	1,57288	-0,639074	0,5509
b12	-3,08E-01	1,86885	-0,16489	0,8755

FONTE: O autor (2020).

TABELA 47 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO a* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	7,39246	0,28819	25,6513	0*
b1	1,33098	0,17648	7,54182	0,0006*
b2	0,048667	0,17648	0,275767	0,7938
b11	0,257728	0,210053	1,22697	0,2745
b22	0,19255	0,210053	0,916673	0,4014
b12	-0,2903	0,24958	-1,16315	0,2973

FONTE: O autor (2020).

TABELA 48 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO b* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	27,6678	0,885031	31,2619	0*
b1	-2,77326	0,541968	-5,11702	0,0037*
b2	-0,08276	0,541968	-0,152696	0,8846
b11	-3,29995	0,645071	-5,11563	0,0037*
b22	-1,0439	0,645071	-1,62E+00	0,1665
b12	0,149524	0,766459	0,195084	0,853

FONTE: O autor (2020).

TABELA 49 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO c* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	28,9606	0,792488	36,544	0*
b1	-2,03822	0,485298	-4,19995	0,0085
b2	-0,35916	0,485298	-0,740091	0,4925
b11	-3,09306	0,57762	-5,35484	0,0031*
b22	-1,02749	0,57762	-1,78E	0,1354
b12	-0,51378	0,686314	-0,748602	0,4878

FONTE: O autor (2020).

TABELA 50 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO h* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	75,2086	1,15092	65,3463	0*
b1	-5,22098	0,704794	-7,40781	0,0007*

b2	-0,84466	0,704794	-1,19845	0,2844
b11	-3,14508	0,838873	-3,74917	0,0133*
b22	-1,14085	0,838873	-1,36	0,2319
b12	-0,70112	0,996729	-0,703417	0,5132

FONTE: O autor (2020).

TABELA 51 – COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO ΔE DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	11,6204	2,14838	5,40893	0,0029*
b1	14,0117	1,31561	10,6504	0,0001*
b2	0,742697	1,31561	0,564527	0,5968
b11	3,5201	1,56589	2,24799	0,0745
b22	1,02228	1,56589	0,652846	0,5427
b12	0,685181	1,86055	0,368267	0,7278

FONTE: O autor (2020).

Onde:

b0 = constante,

b1 = coeficiente linear de temperatura,

b2 = coeficiente linear de tempo,

b11 = coeficiente quadrático de temperatura,

b22 = coeficiente quadrático de tempo,

b12 = coeficiente de interação entre tempo e temperatura,

* = significativo em um intervalo de 95% de confiança.

Nas tabelas 46, 47, 48, 49, 50 e 51 pode-se concluir que as variáveis b0 e b1 foram significativas para todos os parâmetros, em adicional, os parâmetros b*, C* e h* também tiveram influência significativa estatisticamente do coeficiente b11. Isso significa que para a cor a temperatura foi predominante em relação ao tempo e que possivelmente o tempo de uma hora foi o suficiente para alterar as propriedades supracitadas. As Equações 59, 60, 61, 62, 63 e 64 representam os modelos gerados.

$$\hat{L}^* = (64,8437) - (13,8839)T_1 - (0,8443)t_2 - (3,3616)T_1^2 - (1,0052)t_2^2 - (0,3082)T_1t_2$$

Equação 59

$$\widehat{a}^* = (7,3925) + (1,3310)T_1 + (0,0487)t_2 + (0,2578)T_1^2 + (0,1926)t_2^2 - (0,2903)T_1t_2$$

Equação 60

$$\widehat{b}^* = (27,6678) - (2,7733)T_1 - (0,0828)t_2 - (3,3000)T_1^2 - (1,0439)t_2^2 - (0,1495)T_1t_2$$

Equação 61

$$\widehat{C}^* = (28,9606) - (2,0382)T_1 - (0,3592)t_2 - (3,0931)T_1^2 - (1,0275)t_2^2 - (0,5138)T_1t_2$$

Equação 62

$$\widehat{h}^* = (75,2086) - (5,2210)T_1 - (0,8447)t_2 - (3,1451)T_1^2 - (1,1409)t_2^2 - (0,7011)T_1t_2$$

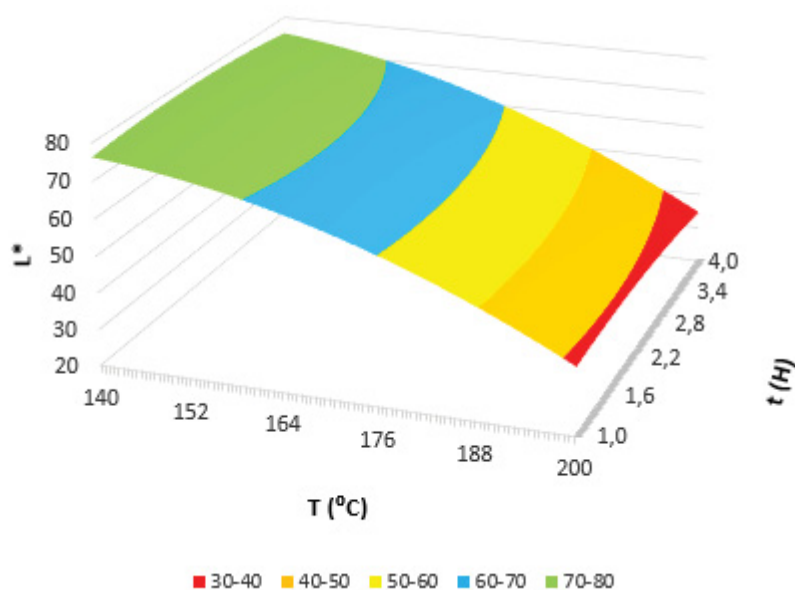
Equação 63

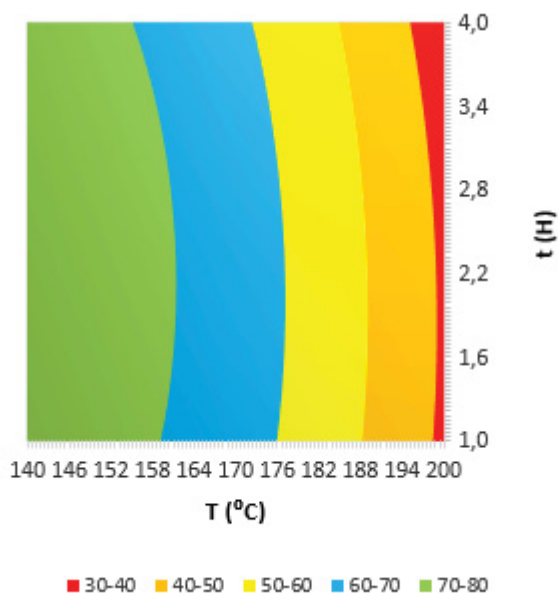
$$\widehat{\Delta E} = (11,6204) + (14,0117)T_1 + (0,742697)t_2 + (3,5201)T_1^2 + (1,0223)t_2^2 + (0,6852)T_1t_2$$

Equação 64

Com os modelos quadráticos significativos gerados para os parâmetros colorimétricos foram possíveis criar os gráficos de metodologia de superfície de resposta e as curvas de nível (Figuras 39, 40, 41, 42, 43 e 44) para facilitar a visualização com comportamento da equação.

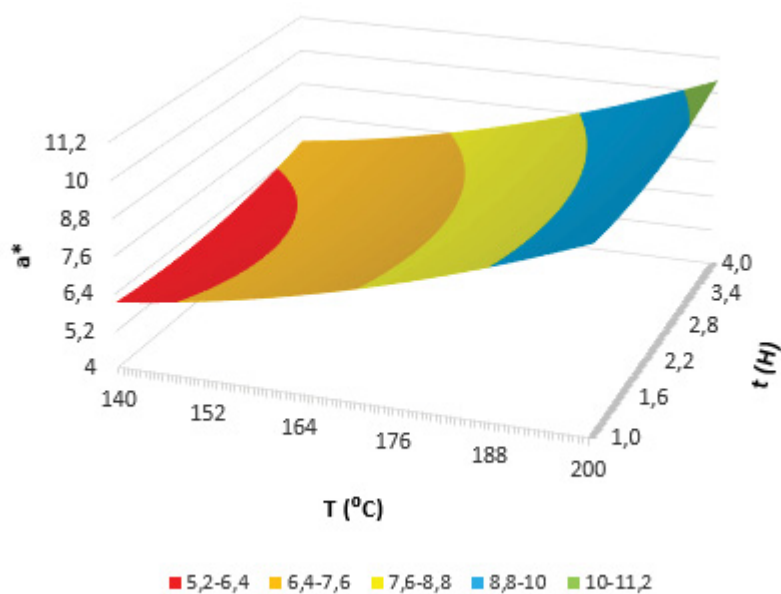
FIGURA 39 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

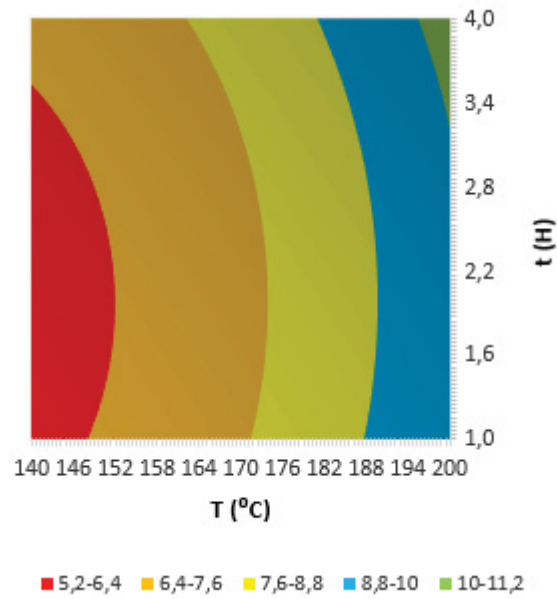




FONTE: O autor (2020).

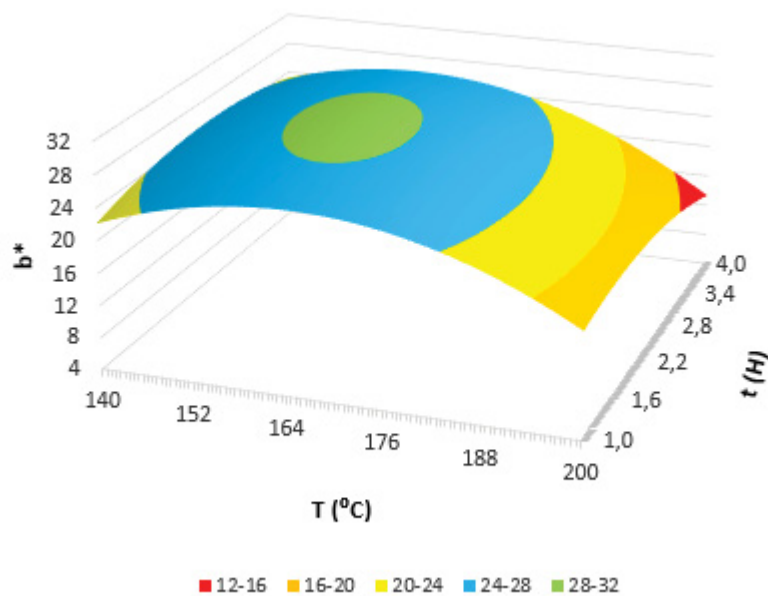
FIGURA 40 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO a^* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

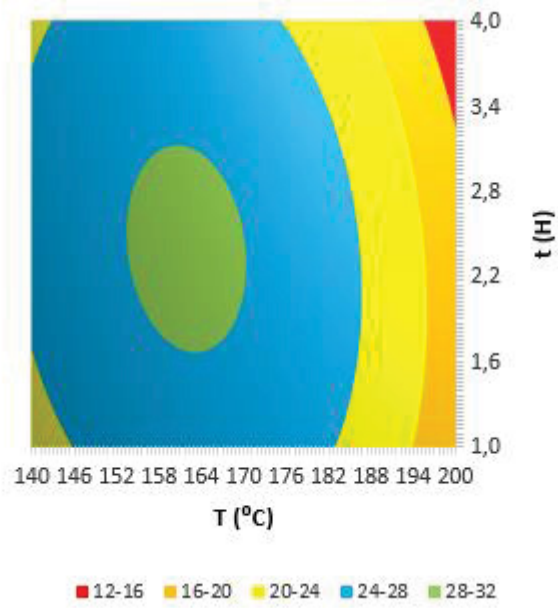




FONTE: O autor (2020).

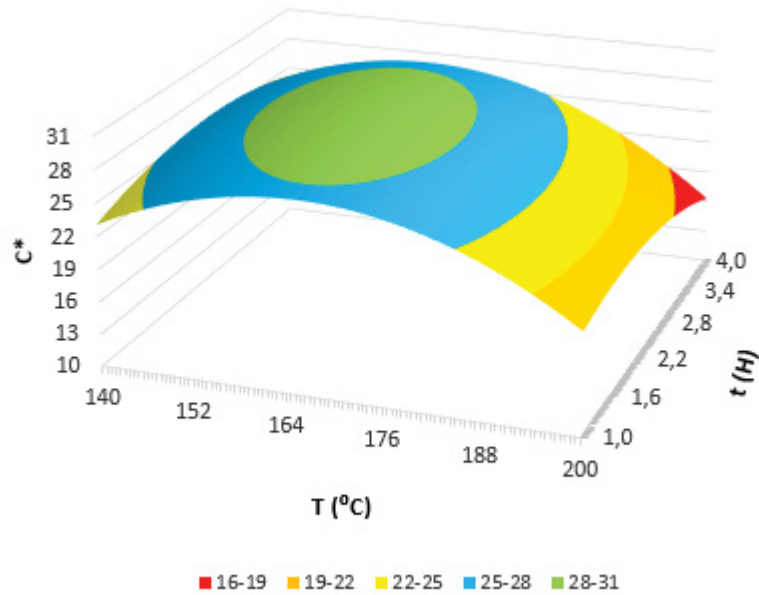
FIGURA 41 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO b^* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

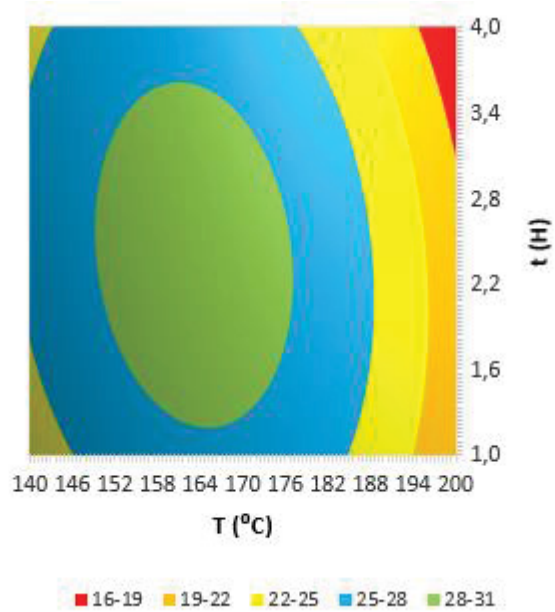




FONTE: O autor (2020).

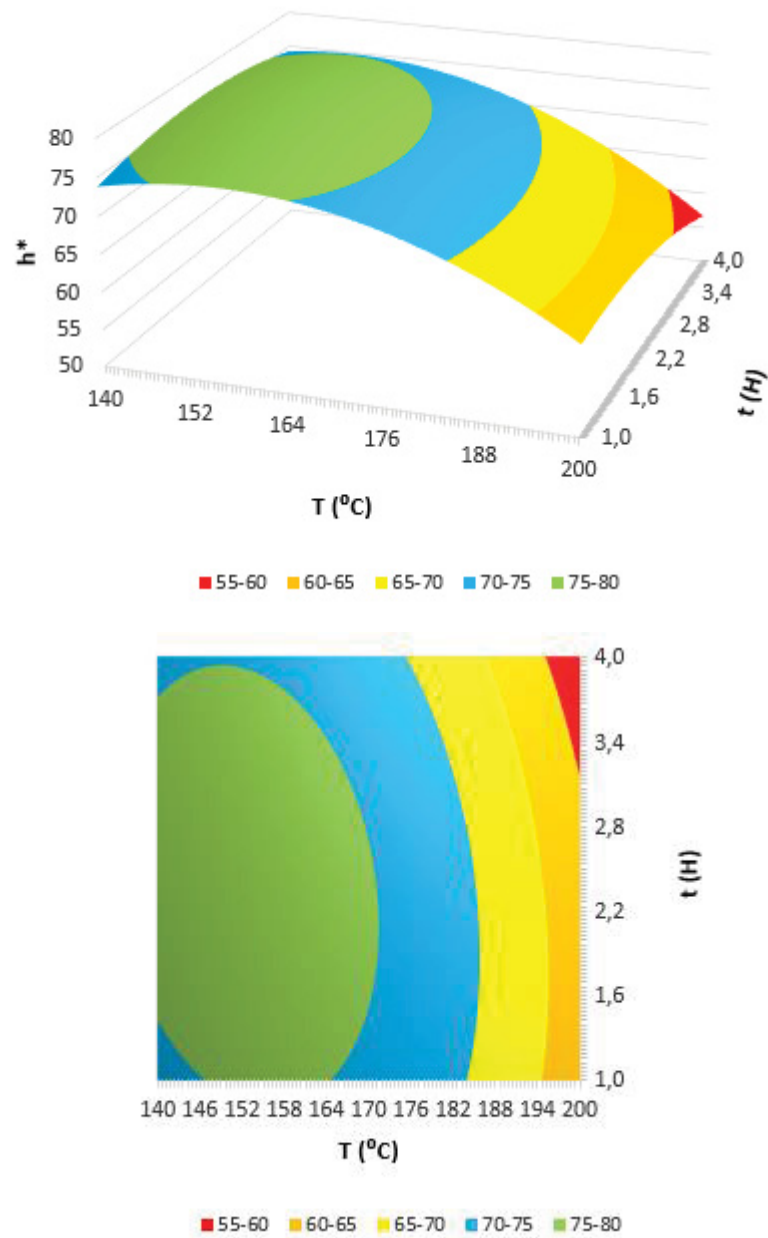
FIGURA 42 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C^* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





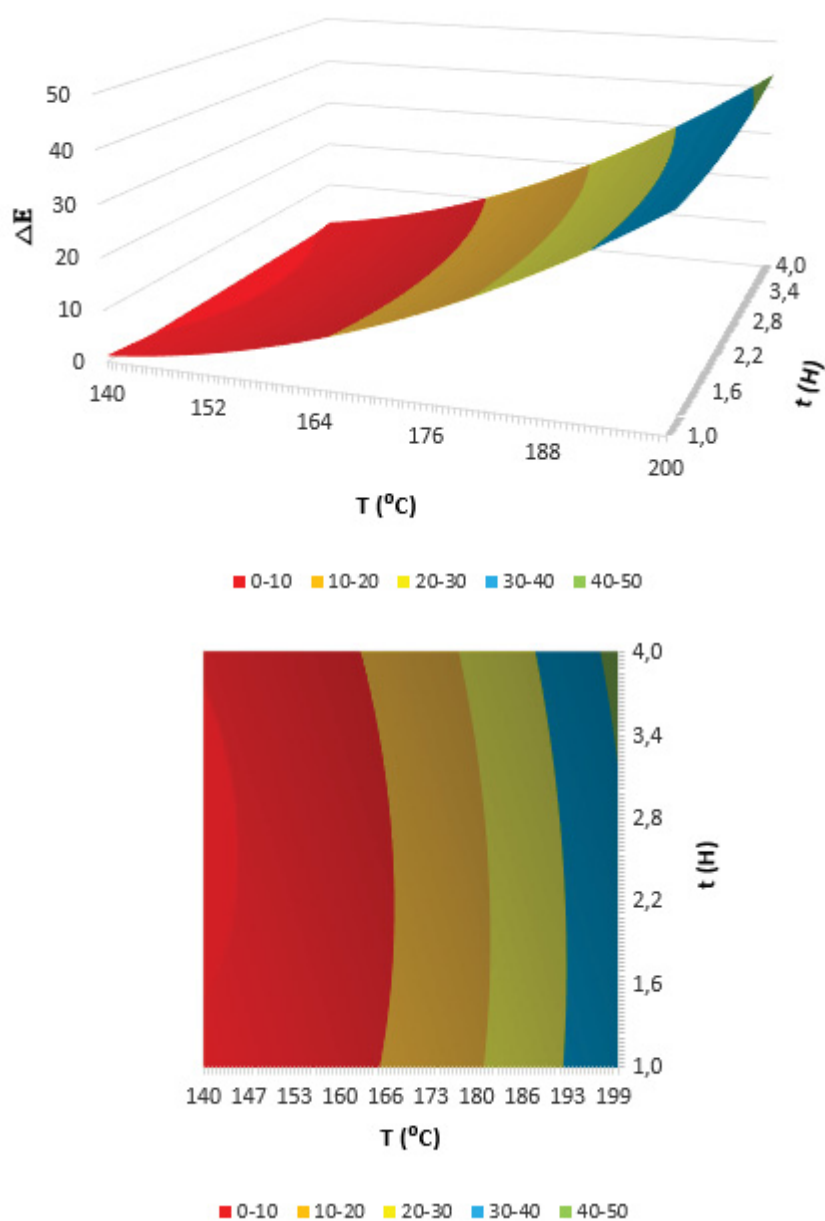
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 43 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO h^* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 44 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO ΔE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



FONTE: O autor (2020).

As Figuras 39, 40 e 44 evidenciam o comportamento crescente dos parâmetros L^* e ΔE e decrescente para a^* . Contudo os parâmetros b^* , C^* e h^* (Figuras 41, 42 e 43) apresentam uma tendência de crescimento em certas faixas de temperatura e tempo, com posterior redução. Dessa maneira, é possível calcular os pontos ótimos desses parâmetros utilizando as derivadas parciais. As Equações 65 e 66 apresentam as derivadas parciais do parâmetro b^* , após isso, resolvendo o sistema de duas variáveis são encontrados os pontos ótimos.

$$\frac{\partial \widehat{b}^*}{\partial T_1} = (-2,7733) - (6,6)T_1 - (0,1495)t_2 = 0 \quad \text{Equação 65}$$

$$\frac{\partial \widehat{b}^*}{\partial t_2} = (-0,0828) - (2,0878)t_2 - (0,1495)T_1 = 0 \quad \text{Equação 66}$$

Para o parâmetro b^* as variáveis não codificadas ótimas são 161,06 °C e 2,49 horas (-0,41998; -0,00959), ocasionando um valor máximo de 28,25. O mesmo processo pode ser realizado para o parâmetro C^* como observado nas Equações 67 e 68.

$$\frac{\partial \widehat{C}^*}{\partial T_1} = (-2,0382) - (6,1862)T_1 - (0,1495)t_2 = 0 \quad \text{Equação 67}$$

$$\frac{\partial \widehat{C}^*}{\partial t_2} = (-0,3592) - (2,055)t_2 - (0,1495)T_1 = 0 \quad \text{Equação 68}$$

Para o parâmetro C^* as variáveis não codificadas ótimas são 163,07 °C e 2,34 horas (-0,32582; -0,15109), ocasionando um valor máximo de 28,99. O mesmo processo pode ser realizado para o parâmetro h^* como observado nas Equações 69 e 70.

$$\frac{\partial \widehat{h}^*}{\partial T_1} = (-2,0382) - (6,1862)T_1 - (0,1495)t_2 = 0 \quad \text{Equação 69}$$

$$\frac{\partial \widehat{h}^*}{\partial t_2} = (-0,3592) - (2,055)t_2 - (0,1495)T_1 = 0 \quad \text{Equação 70}$$

Para o parâmetro h^* as variáveis não codificadas ótimas são 152,62 °C e 2,37 horas (-0,81673; -0,11924), ocasionando um valor máximo de 77,39.

4.9 EXEMPLO SIMPLIFICADO DE APLICAÇÃO

As faixas de temperatura e tempo demandadas na modificação térmica da madeira dependem muito do produto que se busca. Por exemplo, quando se visa utilizar esse material para fins construtivos, pergolados ou até mesmo piso, é importante que as propriedades mecânicas sejam preservadas da melhor forma possível. Quando é o caso de uso para fins estéticos e em ambientes externos, normalmente quanto mais escura e mais hidrofóbica ou estável dimensionalmente a madeira, melhor. Para exemplificar, supondo que uma certa demanda necessite ter ao menos 76 MPa e 9400 MPa de módulo de ruptura e módulo de elasticidade, respectivamente, na flexão estática, 47 MPa e 4800 MPa de módulo de ruptura e módulo de elasticidade, respectivamente, na compressão paralela as fibras e ao menos 26 MPa de dureza Janka, os modelos e os gráficos podem ser utilizados da seguinte forma:

As Equações 48, 49, 50, 51 e 52, apresentam os modelos gerados para as propriedades mecânicas. Supondo também que a averiguação seja realizada nos pontos centrais, apenas para facilitar o entendimento e os cálculos (0;0 ou 170°C; 2,5 H). Observa-se que nos pontos centrais (0;0 ou 170°C; 2,5 H), basta substituir o 0 no lugar de T_1 e t_1 , os valores corresponderiam a 84,97MPa, 10280,1 MPa, 50,11 MPa, 5405 Mpa e 29,33 MPa, o que atenderia a todos os pré-requisitos estipulados.

Nessas mesmas condições, é preditivo dizer que o teor de umidade de equilíbrio higroscópico seria 10,42%, Inchamento volumétrico seria 10,27% e eficiência anti-inchamento seria 31,98%. Sendo assim, mesmo que as propriedades mecânicas atendam a demanda, houve uma relativa melhora na estabilidade dimensional em relação a amostra testemunha. Com relação a cor, é possível dizer que a madeira escurecerá e terá uma cor oliva-amarelado, segundo a classificação de Camargos e Gonzalez (2001), que possui maior valor agregado que o pinus não tratado, tendo uma estética diferenciada.

Esse exemplo simplificado ajuda a visualizar as aplicações possíveis em que o interessado pode observar graficamente a propriedade requerida e testar os valores de tempo e temperatura para prever o valor da variável de interesse. Mas se fosse para definir uma faixa ótima de utilização, como calculado pelo método de otimização das derivadas parciais, seria entre 143°C e 158°C, para temperatura, e 1,78 horas e 2,21 horas, para o tempo, pensando nas propriedades mecânicas. E visando uma

maior estabilidade dimensional ou uma cor com maior valor agregado, seria em faixas próximas a 200°C e 4 horas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

De uma maneira geral o delineamento composto central rotacional e a metodologia de superfície de resposta contribuíram para a modelagem matemática e gráfica da maioria das propriedades tecnológicas propostas. Foi possível obter modelos ajustados e preditivos que foram validados matematicamente e podem ser utilizados. É importante ressaltar que na grande maioria dos modelos, os coeficientes de temperatura foram mais significativos que os coeficientes relacionados ao tempo de exposição.

Houve aumento na perda de massa e redução no teor de umidade de equilíbrio higroscópico, com o aumento da temperatura. Ambos os modelos foram validados e preditivos.

Para os índices de inchamento máximo, apenas o modelo para inchamento linear longitudinal não foi validado. Para o inchamento radial, tangencial e volumétrico, os modelos foram significativos estatisticamente, apresentando uma diminuição com a modificação térmica.

Com relação aos coeficientes de retratibilidade, o tangencial e o volumétrico diminuíram, foram significativos e validados, enquanto o radial e longitudinal não foram validados.

A anisotropia de inchamento não foi influenciada pelas variações de tempo e de temperatura. A eficiência anti-inchamento aumentou, enquanto a taxa de absorção de água teve um comportamento parabólico com concavidade para baixo, podendo ser otimizado. O seu ponto máximo foi em 166,12 °C e 3,19 H, totalizando 58,87%.

Para a massa específica, aquelas que tiveram influência da massa úmida, como a massa específica aparente e a massa específica saturada, não foram significativas. A massa específica básica e a anidra tiveram seus modelos validados, e puderam ser otimizadas, com 160°C, 2,71 horas e 0,5110 g/cm³ para a primeira e 156,88°C, 2,72 horas e 0,588g/cm³ para a segunda.

Em relação ao ângulo de contato ou molhabilidade, os modelos tanto para o plano radial, quanto tangencial foram significativos, sendo o primeiro em média, maior

que o segundo. Também houve uma diminuição no ângulo de contato comparando a medição em 5s e 30s.

Todas essas propriedades supracitadas corroboram para afirmar que a madeira de *Pinus taeda* L. modificada termicamente ficou mais estável dimensionalmente, mais hidrofóbica e perdeu massa.

Com relação as propriedades mecânicas, o módulo de ruptura para a flexão estática diminuiu comparado com a testemunha, entretanto, em certas faixas houve um aumento, podendo ser calculado um ponto ótimo que foi de 158,60°C, 2,21 horas e 86,87 MPa. Para o módulo de elasticidade da flexão estática o comportamento foi similar ocorrendo uma diminuição em valores absolutos, porém também tendo um ponto de máximo que foi calculado em 157,85°C, 1,78 horas e 10551 Mpa.

Para a compressão paralela as fibras o ponto ótimo foi de 143,59°C, 2,86 horas e 52,43 MPa, enquanto para o módulo de elasticidade dessa propriedade o ponto máximo foi em 153,36°C, 2,45 horas totalizando 5562 Mpa. Para dureza janka ocorreu uma diminuição dos valores, não apresentando um ponto de otimização. É possível concluir que há uma diminuição significativa das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* L., todavia, em algumas faixas de temperatura e tempo, há um ligeiro aumento de algumas dessas propriedades.

Para as propriedades colorimétricas houve diminuição do parâmetro L^* , confirmando o escurecimento das peças. Aumento para os parâmetros a^* e ΔE , afirmando uma tendência a ficar mais avermelhada e maior diferenciação de cor, respectivamente. E para os parâmetros b^* , C^* e h^* , observou-se um comportamento parabólico com concavidade para baixo, tendo os pontos otimizados em 161,06°C; 2,49 horas e totalizando 28,25 para o primeiro, 163,07°C; 2,34 horas e 28,99 para o segundo e 152,62°C; 2,37 horas e 77,39 para o terceiro.

É possível destacar que os modelos podem ser utilizados para planejar algum processo que demande algumas das propriedades tecnológicas envolvidas, mas para isso, a aplicação dependerá do produto final desejado. As faixas otimizadas devem ser utilizadas quando essas forem convenientes, todavia, os modelos ajudam a prever como essas propriedades irão se comportar em determinadas temperaturas e tempos.

Atendendo aos objetivos secundários, é possível afirmar que o DCCR e MSR podem ser usados em estudos da área de tecnologia da madeira e engenharia florestal, em especial, para a modificação térmica. A madeira de pinus modificada termicamente, demonstrou ter um grande potencial para futuros estudos e aplicações.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para estudos posteriores que o DCCR e MSR sejam utilizados em outras espécies, e talvez em outras faixas de temperatura e tempo.

Indica-se realizar ensaios químicos, de degradação biológica e de anatomia da madeira.

Recomenda-se testar o DCCR e MSR em outros tipos de pesquisa da área de engenharia e tecnologia florestal, como: painéis, polpa e papel, secagem, entre outros.

É indicado também testar outras quantidades de repetições para averiguar, melhorar e analisar a qualidade dos modelos.

REFERÊNCIAS

- AHAJJI, A.; DIOUF, P. N.; ALOUI, F.; ELBAKALI, I.; PERRIN, D.; MERLIN, A.; GEORGE, B. Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. **Wood Science and Technology**, New York, v. 43, n.1-2, p. 69-83, 2009.
- AKYILDIZ, M. H.; ATES, S.; OZDEMIR, H. Technological and chemical properties of heattreated Anatolian black pine wood. **African Journal of Biotechnology**, South Africa, v. 8, n. 11, p. 2565- 2572, 2009.
- ALÉN, R.; KOTILAINEN, R.; ZAMAN, A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225°C. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 36, n. 2, p. 163-171, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143**: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West conshohocken, 2014.
- ATES, S.; AKYILDIZ, M. H.; OZDEMIR, H. Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood. **BioResources**, v. 4, n. 3, p. 1032-1043, 2009.
- AWOYEMI, L.; JONES, I.P. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 45, n. 2, p. 261-267, 2011.
- AYDEMIR, D. **The effect of heat treatment on some physical, mechanic and technological properties of Uludag Fir (*Abies bornmülleriana* Mattf.) and Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Zonguldak Karaelmas, Zonguldak, 2007.
- BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP SystemeHolzSysteme®**. 2012. 339 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2012.
- Batista, D. Retificação térmica, termoretificação, tratamento térmico, tratamento com calor ou modificação térmica?. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 463-480, 2019.
- BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos - Aplicações na ciência e na indústria**. Porto Alegre: Editora Bookman, 4Ed, 2010.
- BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 57, n. 5, p. 539–546, 2003.
- BELLON, K. R. R. **Modificação térmica da madeira de três espécies de florestas plantadas pelo processo vap HolzSysteme®**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2013.

BHUIYAN, M. T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Effect of Intermittent Heat Treatment on Crystallinity in Wood Cellulose. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 47, n. 5, p. 336-416, 2001.

BOONSTRA, M. **A two-stage thermal modification of wood**. 2008. 297 f. Tese (Doutorado) - Ghent University and Université Henry Poincaré, Nancy, 2008.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 64, n. 3, p. 204-211, 2006.

BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

BRITO, J. O. Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** São Paulo: SBS/SBEF, 1993. p.774.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.

BURTIN, P.; JAY-ALLEMAND, C.; CHARPENTIER, J. P.; JANIN, G. Modifications of Hybrid Walnut (*Juglans nigra* 23 x *Juglans regia*) Wood Colour and Phenolic Composition Under Various Steaming Conditions. **Holzforschung**, Berlin, v. 54, n. 1, p. 33-38, 2000.

CADEMARTORI, P. H. G. DE; MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A. Effect of thermal treatments on technological properties of wood from two *Eucalyptus* species. **Anais da academia brasileira de ciências**. v. 87, n. 1, p. 471-481, 2015.

CADEMARTORI, P. H. G. DE. **Propriedades tecnológicas da madeira termorretrificada de três espécies de Eucalyptus**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de materiais) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas (RS), 2012.

CALONEGO, F. W. **Caracterização tecnológica da madeira de Schizolobium parahyba (Vell.) Blade modidificada termicamente**. 2017. 161 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu (SP), 2017.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BALLARIN, A. W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products / Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 70, p. 453- 460, 2012.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorretrificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden**. 2009. 149 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – UNESP, Botucatu (SP), 2009.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 71, p. 30-41, 2001.

CANADA'S WOOD FOREST PRODUCTS INSTITUTE (FORINTEK). **Thermally modified wood**. Quebec/Vancouver, 2003. Technical Profile TP- 03-01E.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2002.

CARVALHO, D. E. **Caracterização Tecnológica e Densificação Termomecânica da Madeira de Gmelina arborea Roxb.**. 2020. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2020.

CHAUHAN, S. S.; AGGARWAL, P. Effect of moisture sorption state on transverse dimensional changes in wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlim, v. 62, n. 1, p. 50-55, 2004.

CHOW, S.-Z.; MUKAI, H. N. Effect of thermal degradation of cellulose on wood-polymer bonding. **Wood Science**, v. 4, n. 4, p. 202-208, 1972.

COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção**. 2004. 16 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá (MG), 2004.

COST ACTION E22: **Environmental optimisation of wood protection**, 2001, Antibes. Review on heat treatments of Wood. Hamburg: The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Information and Documentation, 2001.

DING, T.; GU, L.; LIU, X. Influence of steam pressure on chemical changes of heat-treated mongolian pine wood. **BioResources**, v. 6, n. 2, p. 1880-1889, 2011.

DUBEY, M. K. **Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil**. 2010. 211 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Canterbury, Canterbury, 2010.

EBNER, D.; STELZER, R.; BARBU, M.C. Study of wooden surface carbonization using the traditional Japanese Yakisugi technique. **Pro Ligno**, v. 15, n. 4, 2019.

ENGINEERING, 5., 2000, Switzerland. **Anais eletrônicos...** Switzerland: CIB-W18 Meeting 33, 2000.

ESTEVEZ, B.; PEREIRA, H. Wood modification by heat treatment: a review. **Bioresources. Raleigh**, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.

ESTEVEES, B. M.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, Berlin/New York, v. 62, n. 3, p. 344-351, 2008.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® handbook** Helsink, 2003.

FONTES, M. M. **Otimização da síntese de biodiesel a partir de óleos das sementes de algodoeiro**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande (PB), 2012.

FRANÇA, R. F. **Correlação estrutura/propriedades das madeiras termotratadas de *Pinus sp.* e *Eucalyptus spp.*** 2019. 87 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2019.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO - FAPESP. Elias Taylor Durgante Severo e Fred Williams Calonego. Processo de modificação térmica por irradiação de calor, para a melhora da estabilidade dimensional e da durabilidade biológica de madeira sólida - PI 0902138-8 A2. 24 Jun. 2009 01 Mar. 2011.

GALDAMEZ, E. V. C.; CARPINETTI, L. C. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. **Revista Gestão e Produção**, v. 11, n. 1, p. 121-134, 2004.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111 f.

Garcia, L. C. **Microencapsulação por spray-drying de óleo essencial de manjeriço**. 2013. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas (SP), 2013.

GRIEBELER, C. G. O. **Colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden modificada termicamente**. 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2013.

GUEDES, T. A. **Procedimentos de otimização no planejamento e controle da qualidade de produtos e processos**. 1996. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), 1996.

GUERRA, M. F. **Efeito do tratamento térmico em forno à vácuo e reator sobre propriedades mecânicas e colorimétricas da madeira de três espécies florestais**. 2015. 52 f. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília (DF), 2015.

HAALAND, P.D. **Statistical Problem Solving**. In: Haaland, P.D., Ed., *Experimental Design in Biotechnology*, Marcel Dekker, New York, 1989, 1-18.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; GÉRARDIN, P. Investigations of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 1-5, 2005.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **Forest products and wood science: an introduction**. Iowa: Iowa State University Press: AMES, 1996. 484 p

HIKITA, Y.; TOYODA, T.; AZUMA, M. **Weathering testing of timber – discoloration**. In: IMAMURA, Y. High performance utilization of wood for outdoor uses. Kyoto, Japão: Press-net, 2001.

HILL, C. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.

HOMAN, W.; TJEERDSMA, B.; BECKERS, E.; JORISSEN, A. **Structural and other properties of modified wood**. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER 96.

HULLER, L.; HASELEIN, C.; SILVEIRA, A.; MENEZES, W.; TALGATTI, M.; SOUZA, J.; SANTINI, E. Modificação térmica e propriedades tecnológicas da madeira de Eucalyptus cloeziana. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 183-188, 2017.

JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. **Heat treatment of wood - better durability without chemicals**. In: COST ACTION E22, 2001, Antibes. Proceedings of special seminar “Review on heat treatments of wood”. Hamburg: The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Information and Documentation, 2001. p. 21-26.

JUIZO, C.G.F.; ZEN, L.R.; KLITZKE, W.; FRANÇA, M.C.; CREMONEZ, V.G.; KLITZKE, R.J. Propriedades tecnológicas da madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 5, p. 537-542, 2018.

KARTAL, S. N.; HWANG, W.-J.; IMAMURA, Y. Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 198, n. 1–3, p. 234-240, 2008.

KEINERT JUNIOR, S. **Laboratory evaluation of Eucalyptus grandis and Eucalyptus robusta for the manufacture of composition board**. 1980. 184 f. Thesis (Ph.D. in Phylosophy) - Department of Forestry, Michigan State University, 1980.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTE JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlarg, 1968. 592p.

KORKUT, D. S.; GULLER, B. The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 8, p. 2846-2851, 2008.

KORKUT, S.; AKGÜL, M.; DÜNDAR, T. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*, L) wood. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 6, p. 1861-1868, 2008.

KOROŠEC, R.C.; LAVRIČ, B.; REP, G.; POHLEVEN, F.; BUKOVEC, P. Thermogravimetry as a possible tool for determining modification degree of thermally treated Norway spruce wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v. 98, p. 189-195, 2009.

LENGOWSKI, E. C. **Efeito da termorreificação nas propriedades anatômicas, físico-mecânicas e químicas das madeiras de Pinus taeda, Eucalyptus grandis e Tectona grandis**. 2011. 103 f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LIMA, C. N. **Escolha de tratamentos e blocagem otimizados na construção de fatoriais fracionários**. 2009. 147 f. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras (MG), 2009.

LIMA, C. N.; BUENO FILHO, J. S. S. Escolha de tratamentos otimizados na construção de fatoriais fracionários. **Revista Brasileira de Biomassa.**, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 1-14, 2010.

MARTON, J. M.; FELIPE, M. das G. de A.; SILVA, J. B. de A. Avaliação de carvões ativos e das condições de adsorção no tratamento do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana empregando planejamento de experimentos. **Revista Analytica**, São Paulo, n. 3, p. 45-53, 2003.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; BOCQUET, J. F.; PETRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of Grevillea robusta wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 2, p. 401-405, 2008.

MCDONALD, A.; FERNANDEZ, M.; KREBER, B. Chemical and UV-VIS spectroscopic study on kiln brown stain formation in Radiata pine. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 9., 1997, Montréal. **Proceeding**. Montréal, 1997, v. 70, p. 1-5.

MENDONÇA, L. A. **Desempenho do delineamento composto central em experimentos com alto coeficiente de variação**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG), 2012.

METSÄ-KORTELAJINEN, S.; ANTIKAINEN, T.; VIITANIEMI, P. The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pines and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 64, n. 3, p. 192-197, 2005.

Metsä-Kortelainen, S.; & Viitanen, H. Wettability of sapwood and heartwood of thermally modified Norway spruce and Scots pine. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 1-3, p. 135-139, 2012.

MILITZ, H., TJEERDSMA, B. **Heat treatment of wood by the PLATO-process**. In: COST ACTION E 22, 2001, Antibes. Proceedings of special seminar "Review on heat treatments of wood". Hamburg: The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Information and Documentation, 2001. p. 27-37.

MITCHELL, P. H. Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen. **Wood and Fiber Science**, v. 20, n. 3, p. 320-355, 1988.

MILITZ, H.; ALTGEN, M. **Processes and properties of thermally modified wood manufactured in Europe**. In: SCHULTZ, T. P.; GOODELL, B.; NICHOLAS, D. D. (Ed.). Deterioration and protection of sustainable materials. Washington: Oxford University Press, 2014. p. 269-285.

MITSUI, K.; TAKADA, H.; SUGIYAMA, M.; HASEGAWA, R. Changes in the Properties of Light-Irradiated Wood with Heat Treatment: Part 1. Effect of Treatment Conditions on the Change in Color. **Holzforschung**, v. 55, n. 6, p. 601-605, 2004.

MITSUI, K.; TAKADA, H.; SUGIYAMA, M.; HASEGAWA, R. Changes in the properties of lightirradiated wood with heat treatment Part 1. Effect of treatment conditions on the change in color. **Holzforschung**, Berlin, v. 55, n. 6, p. 601-605, 2001.

MODES. K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológicas das madeiras de Pinus taeda e Eucalyptus grandis**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS), 2010.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 9 ed. John Wiley & Sons, New York, 2017.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; HUBER, F.; PETRISSANS, M.; GERARDIN, P. Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of Grevillea robusta wood. **Polymer Degradation and Stability**, Amsterdam, v. 93, p. 401-405, 2008.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

NUOPPONEN, M., VUORINEN, T., JAMA, S., VIITANIEMI, P. Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and resonante Raman Spectroscopies. **Journal of wood Chemistry and Technology**, Philadelphia, v. 24. p. 13-26, 2005.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (SP), 1997.

OLIVEIRA, S. A. et al. Physical and mechanical properties of heat treated wood from *Aspidosperma populifolium*, *dipteryx odorata* and *mimosa scabrella*. **Maderas**, Cienc. tecnol., v. 18, n. 1, p. 143-156, 2016.

OKON, K. E.; UDOAKPAN, U. I. Physicochemical properties of *Pinus massoniana* wood subjected to silicone oil heat treatment. **Maderas**, Ciência e Tecnologia, Concepción, v. 21, n. 4, p. 531-544, 2019.

PAULA, Marcella Hermida de. **Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e Sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess)**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília (DF), 2016.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Efeito da termorreificação no envernizamento, colagem e cor da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 1999. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba (SP), 1999.

POUBEL, D.S.; GARCIA, R.A.; SANTOS, W.A.; LELIS, R.C.C.; VIEIRA, L.A.A. Análises físicas e colorimétricas da madeira de *Pinus* sp. modificada termicamente. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 511-521, 2015.

QUIRINO, W. F. **Preservação de estacas e mourões de cerca por retificação térmica e impregnação de pirolenhosos e alcatrões**. Brasília, 1997. Relatório final de projeto de pesquisa, LPF/IBAMA-PNUD/FAO-UnB.

RAPP, A. O.; SAILER, M. **Oil heat treatment of wood in Germany – State of the art**. In: COST ACTION E22: Environmental Optimisation of Wood Protection, 2001, Antibes. Proceedings of special seminar “Review on heat treatments of wood”. Hamburg: The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Information and Documentation, 2001. p. 47-64.

RODRIGUEZ, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. Campinas, SP, 3 ed., 2014.

ROUSSET, P.; PERRÉ, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by thermal treatment at high temperature. **Holz als Rohund Werkstoff**, Berlin, v. 62, p. 113-119, 2004.

SANDBERG, D.; KUTNAR, A. Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America. **Wood and Fiber Science**, Monona, v. 48, nesp, p. 28-39, 2016.

SANTOS, G. P. **Metodologia de Superfície de Resposta Aplicada à Secagem de Frutos de Macaúba para Obtenção de Óleo de Polpa de Alta Qualidade**. 2014. 83 f. Dissertação (Mestre em Biotecnologia) - Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande (MS), 2014.

SARAMAGO, S. P.; STEFFEN JÚNIOR, V.; SILVA, J. D.; SARAMAGO, S. F. P. Planejamento de experimentos e otimização de sistemas mistos. **FAMAT em Revista**, n.11, 2008.

SCHULZ, H. R et al. Efeito do tratamento térmico da madeira de *Pinus elliottii* nos parâmetros físico-mecânicos e colorimétricos. **BIOFIX Scientific Journal**, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 86-93, 2020.

SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Physical and chemical changes in juvenile and mature woods of *Pinus elliottii* var. *elliottii* by thermal modification. **European Journal of Wood and Wood Products / Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 70, n. 5, p. 741-747, 2012.,

SIAU, J. F. **Transport process in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245p.

SKAAR, C. **Wood-water relation**. New York: Spring-Verlag. 1988. 283p.

SILVA, M. R. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto citriodora e Pinus taeda**. 2012. 223f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2012.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. New York: The Ronald Press, 1964.

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 2004. 154 f. Tese (Doutorado) - Division of Wood Material Science, Luleå University of Technology, Skellefteå, 2004.

SUNDQVIST, B.; MORÉN, T. The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 60, p. 375-376, 2002.

SYRJÄNEN, T. **Production and classification of heat treated wood in Finland**. In: COST ACTION E22: Environmental Optimisation of Wood Protection, 2001, Antibes. Proceedings of special seminar "Review on heat treatments of wood". Hamburg: The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Information and Documentation, 2001. p. 11-19.

TAVORA, M. V. G. **Aptidão de lamelas termo-modificadas de pinus taeda L. para a produção de madeira laminada colada (MLC)**. 2019. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2019.

TEOFILO, R. F.; FERREIRA, M. M. C. Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 338-350, 2006

THEANDER O.; BJURMAN J.; BOUTELJE J. B. Increase in the content of low-molecular carbohydrates at lumber surfaces during drying and correlations with

nitrogen content, yellowing and mould growth. **Wood Science and Technology**, New York, v. 27, n. 5, p. 381-389, 1993.

TJEERDSMA, B. F.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; TEKELY, P.; MILITZ, H. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 56, p. 149-153, 1998.

TODARO, L.; ZANUTTINI, R.; SCOPA, A.; MORETTI, N. Influence of combined hydro-thermal treatments on selected properties of Turkey oak (*Quercus cerris* L.) wood. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1, p. 563-578, 2012.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 63, n. 2, p. 102-111, 2005.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 63, n. 2, p. 102-111, 2005.

VERNOIS, M. **Heat treatment of wood in France - state of the art**. In: COST ACTION E22: Environmental Optimisation of Wood Protection, 2001, Antibes. Proceedings of special seminar "Review on heat treatments of wood". Hamburg: The Federal Research Centre.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M. Efeito do aquecimento na estabilidade dimensional e na higroscopicidade da madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 6, n. 2, p. 150-161, 1982.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; EUCLIDES, R. F. Efeito do aquecimento em algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 7, n. 2, p. 136-146, 1983.

WASKETT, P.; SELMES, R. E. **Opportunities for UK grown timber: wood modification state of the art review**. Building Research Establishment LTD, proj nº 203-343, 2001, 83p.

WIKBERG, H.; MAUNU, S.L. Characterization of thermally-modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. **Carbohydrate Polymers**, v. 58, n. 4, p. 461-466, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

O Apêndice 1 refere-se aos teste de normalidade e homogeneidade para cada propriedade em que para a assimetria e curtose é orientado pelo próprio software (Statgraphics XVIII ®) que para ser considerados dados normalizados os valores devem estar entre -2 e 2, o que ocorre em todas as propriedades, o teste de Shapiro-Wilk, também pode ser usado para testar a normalidade e apenas a massa específica saturada foi considerada com dados não normais, o que não será um problema, pois os outros parâmetros também não validam o modelo. O teste de Levene, testa a homogeneidade dos dados em que a hipótese nula (abaixo de 0,05), considera os dados sendo não homogêneos e valores acima de 0,05 rejeita a hipótese nula, corroborando para afirmar a homogeneidade dos dados, o que ocorreu com todas as propriedades.

TESTE DE NORMALIDADE E HOMOGENEIDADE

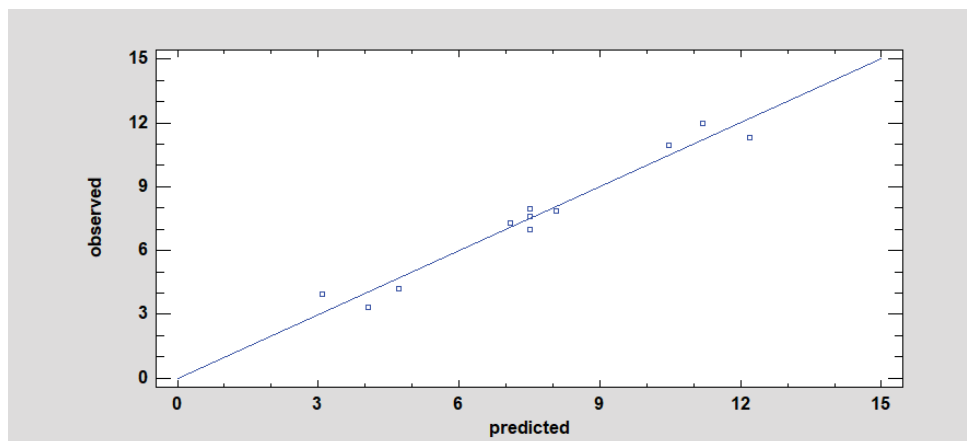
Propriedade	Assimetria (kewness)	Curtose (Kurtosis)	Shapiro-Wilk	Levene
PM	0,0685386	-0,686808	0,3114	0,8999
Tue	-1,02819	-0,712665	0,1153	0,8556
IR	-0,386614	-0,474361	0,9113	0,8576
IT	0,129668	-0,679066	0,590953	0,9038
IL	0,225414	-0,75712	0,7998	0,1024
IV	-0,479243	-0,66695	0,2314	0,9528
QR	-0,526655	0,0326514	0,8784	0,6371
QT	-0,0476773	-0,205335	0,3531	0,9270
QL	0,161595	-0,802578	0,7723	0,0555
QV	-1,47747	0,27219	0,0906	0,8104
Ai	1,10028	-0,135048	0,1022	0,3368
TA	-0,00402472	-1,11854	0,3392	0,6009
EAI	0,480675	-0,667322	0,2717	0,9501
Me _{12%}	0,556365	-0,955176	0,2538	0,5315
Meb	0,429987	-1,14151	0,6112	0,9118
Me _{sat}	0,47454	-0,724274	0,0045	0,4011
Me _{0%}	-1,69573	0,0109009	0,3981	0,8658
AR5S	0,341808	-0,782322	0,6959	0,5050
AR30S	-0,845305	-0,697631	0,1460	0,9028
AT5S	0,939188	-0,633104	0,1287	0,8501
AT30S	0,735314	-0,554191	0,2081	0,8721
FE	-1,40142	-0,261875	0,0658	0,9456
FMOE	-1,6529	-0,0347546	0,0765	0,8842
CP	-1,05178	-0,413945	0,1599	0,6687
CMOE	-0,93437	-0,528983	0,1123	0,9523
DJ	-0,354079	-0,712573	0,7430	0,8049
L*	-0,828459	-0,695786	0,0676	0,8957
a*	0,833684	-0,479716	0,2694	0,9467
b*	-1,41579	-0,353449	0,0504	0,9007

C*	-0,848044	-0,432846	0,2249	0,8884
h*	-1,6579	-0,200897	0,0680	0,8320
ΔE	0,886149	-0,684633	0,1837	0,8884

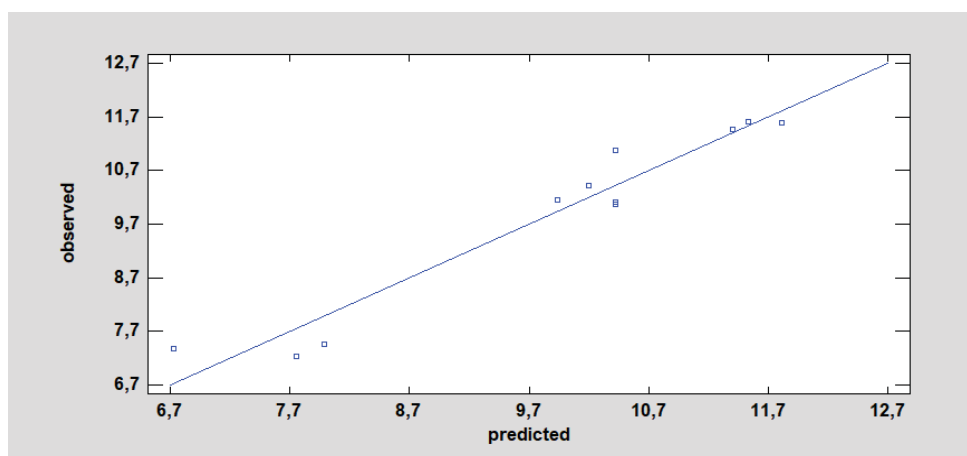
APÊNDICE 2

O Apêndice 2 refere-se a comparação entre os dados previstos e os observados para cada propriedade tecnológica. Pereira Filho (2017), relata que a comparação gráfica entre os valores, corrobora para validação do modelo.

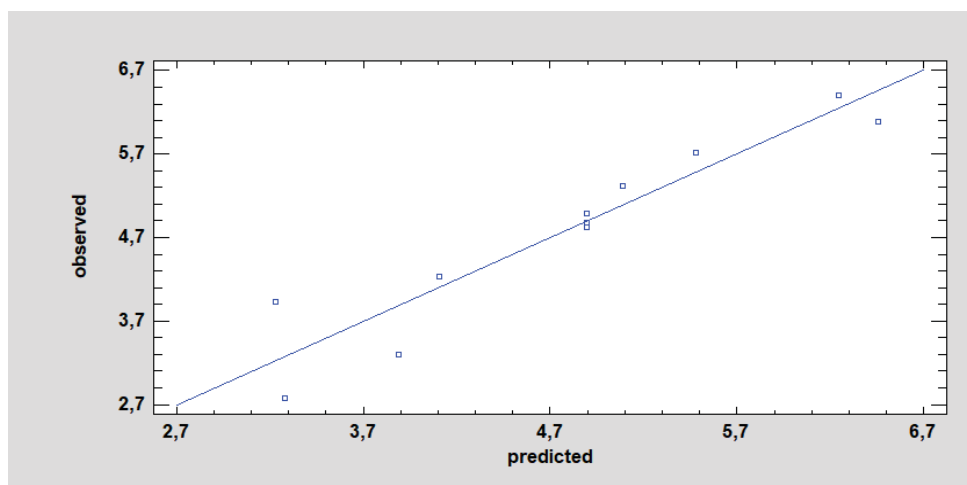
FIGURA – DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A PERDA DE MASSA



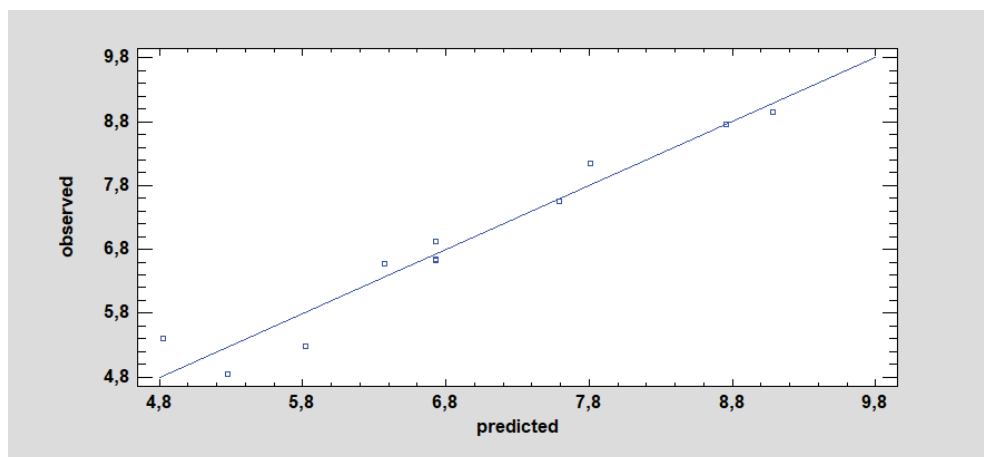
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO



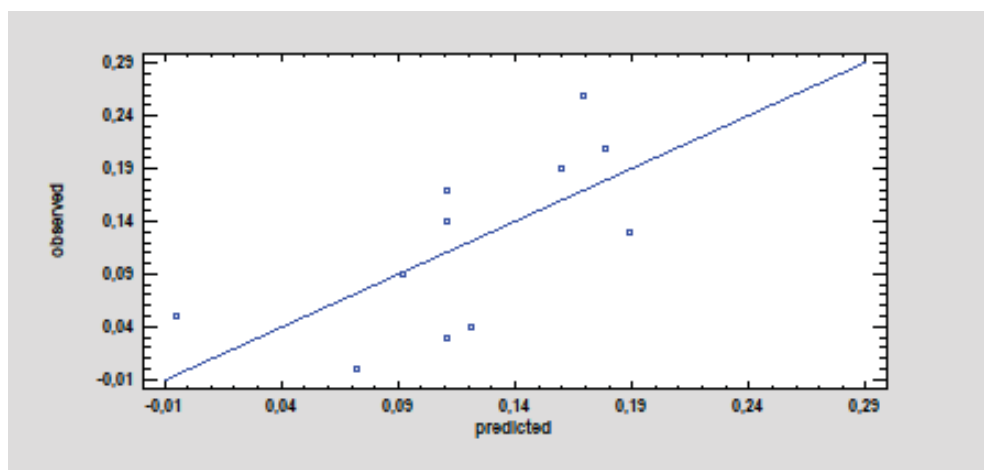
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA O INCHAMENTO RADIAL MÁXIMO



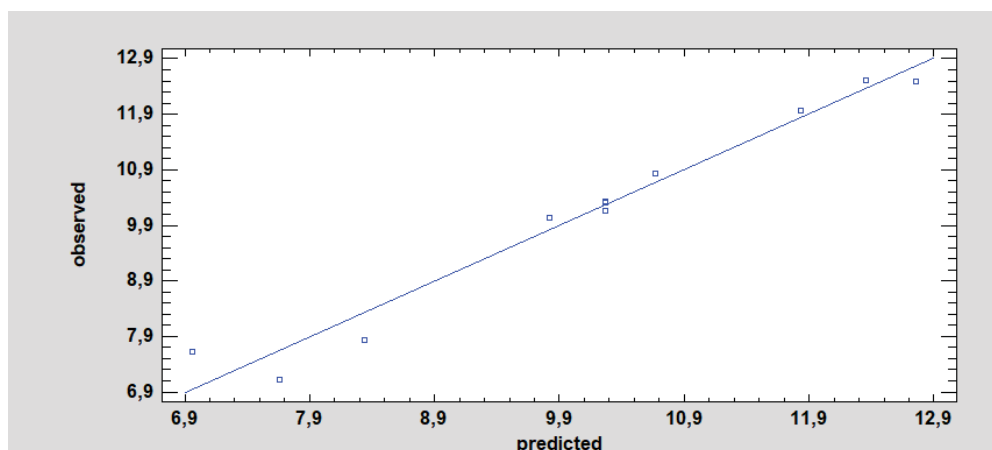
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA O INCHAMENTO TANGENCIAL MÁXIMO



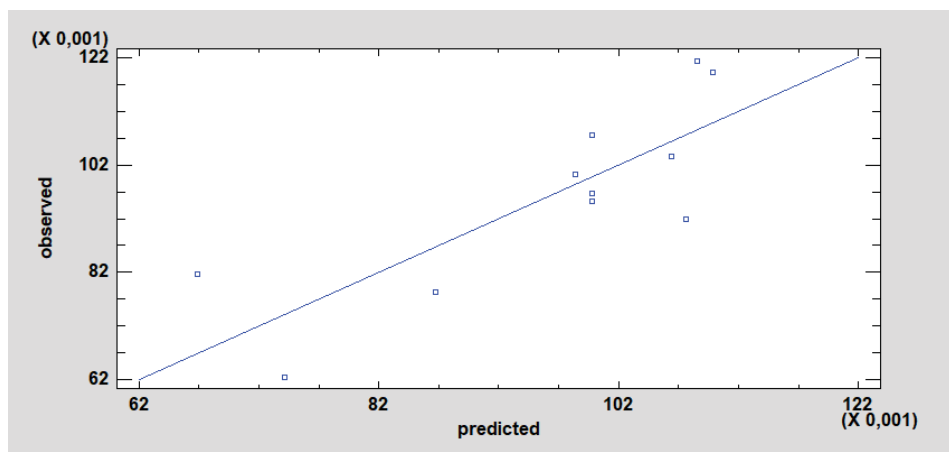
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA O INCHAMENTO LONGITUDINAL
MÁXIMO



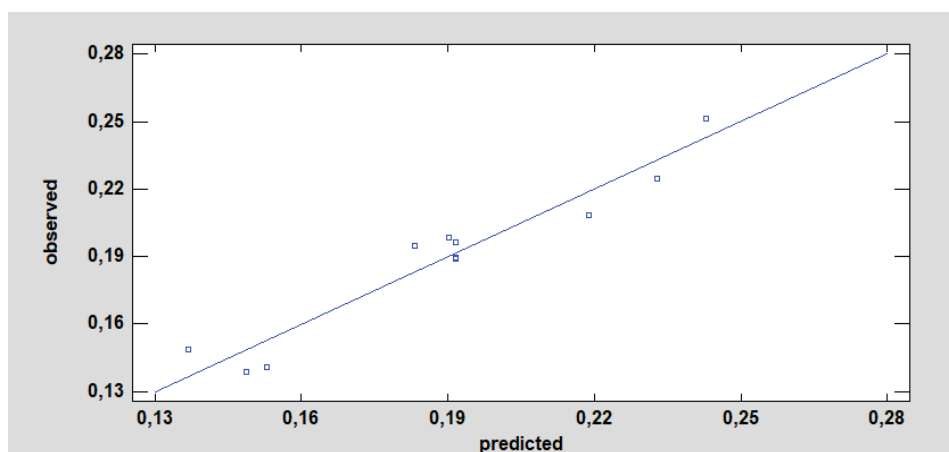
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA O INCHAMENTO VOLUMÉTRICO
MÁXIMO



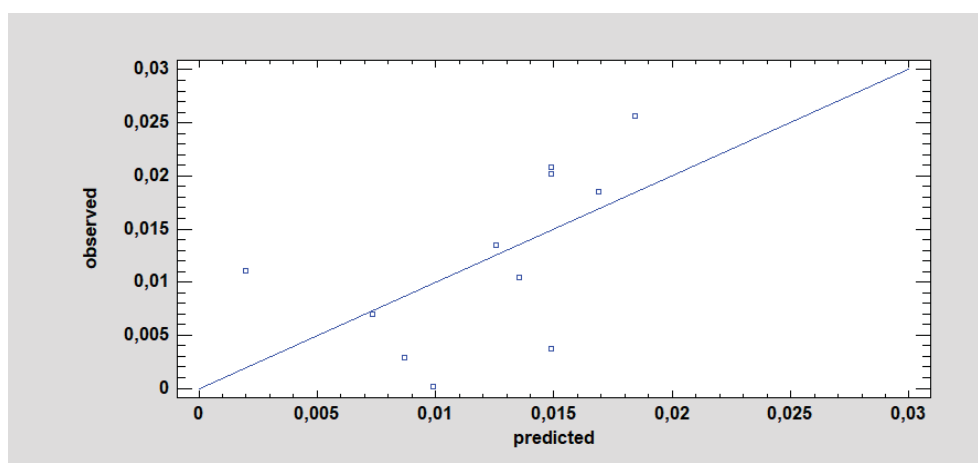
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE
RADIAL



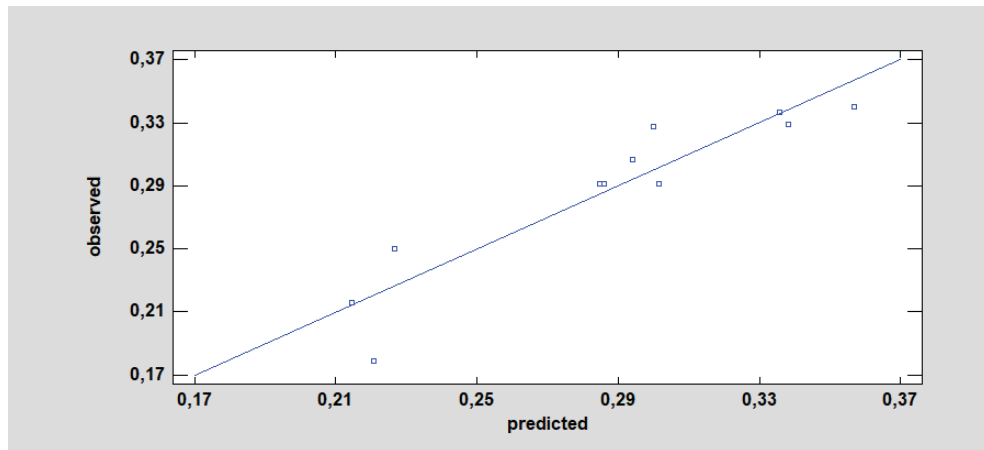
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE TANGENCIAL



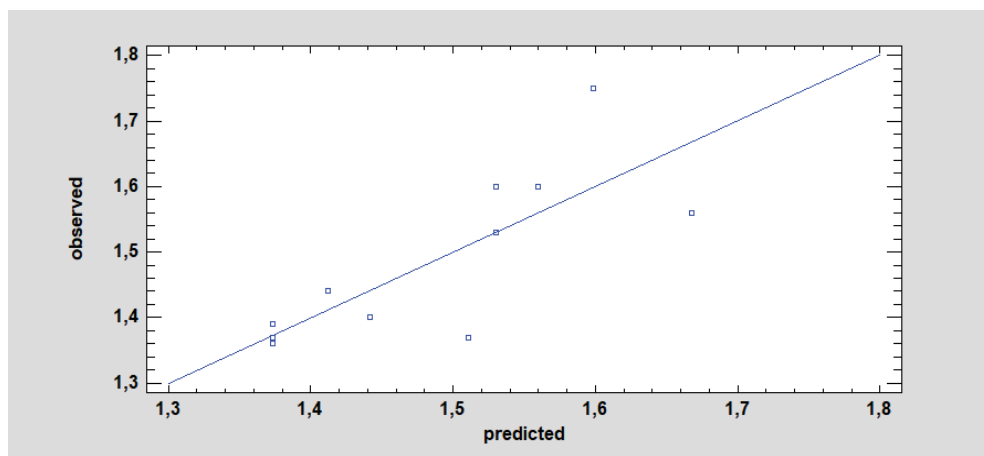
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE LONGITUDINAL



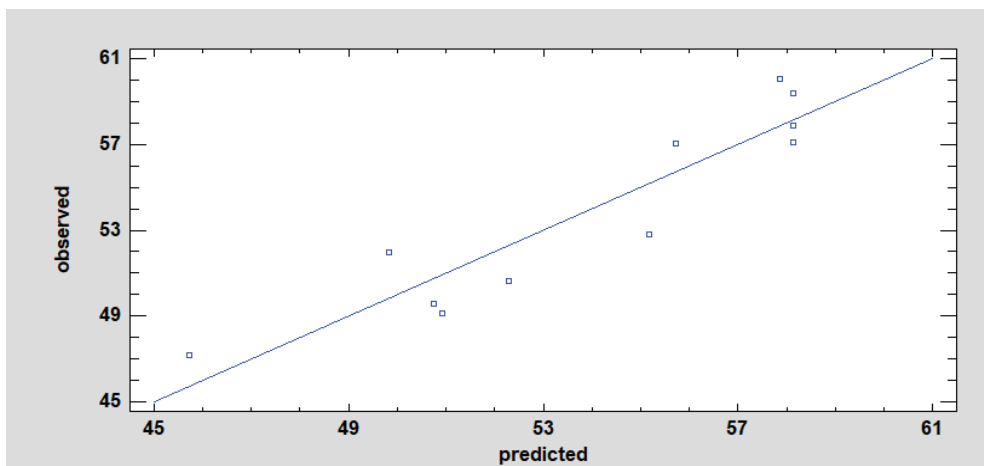
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICO



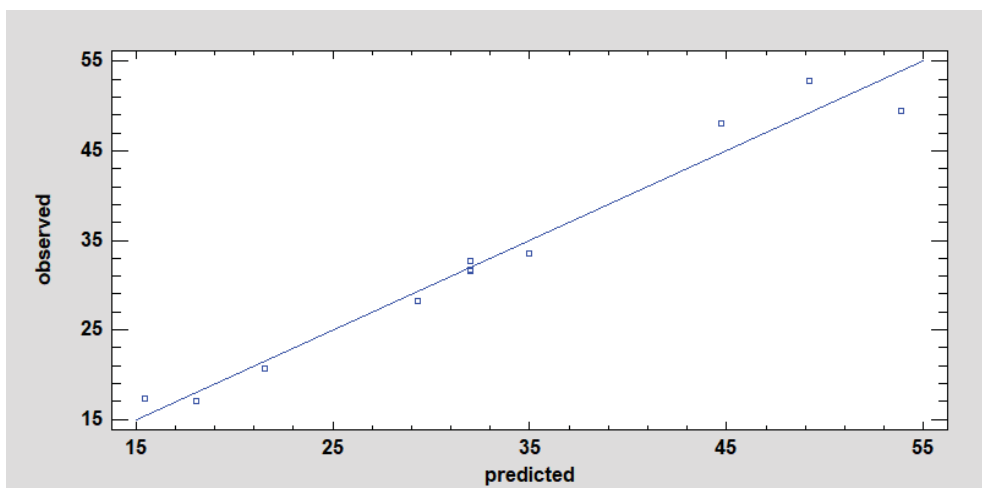
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA ANISOTROPIA DE INCHAMENTO



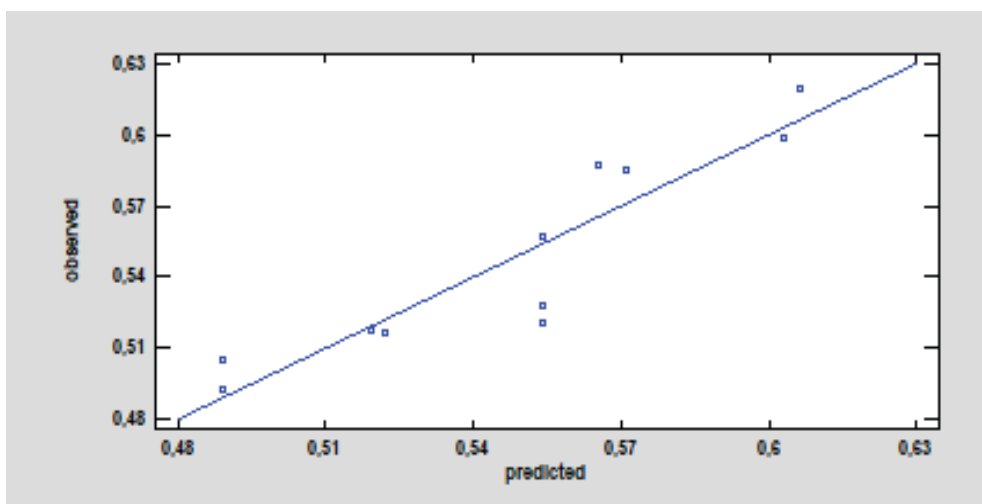
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA



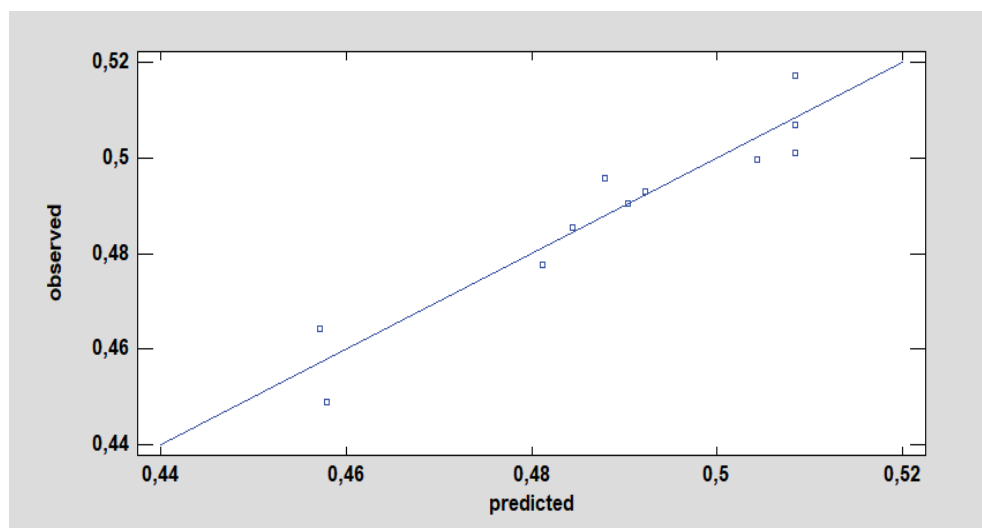
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO



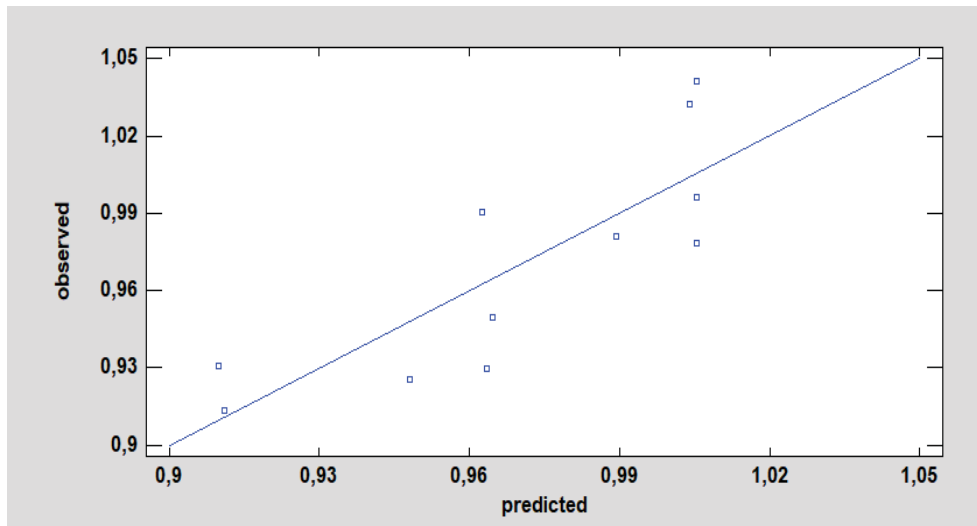
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 12%



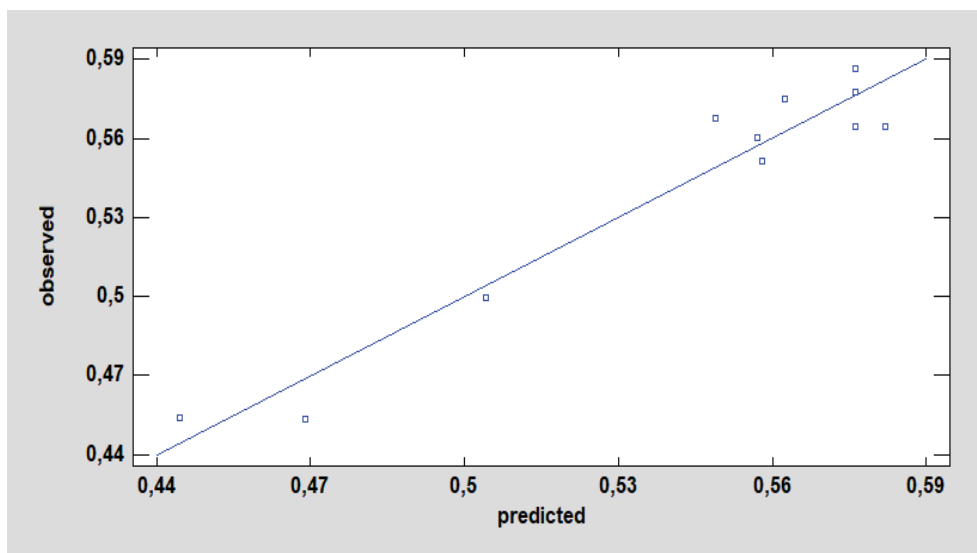
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A MASSA ESPECÍFICA BÁSICA



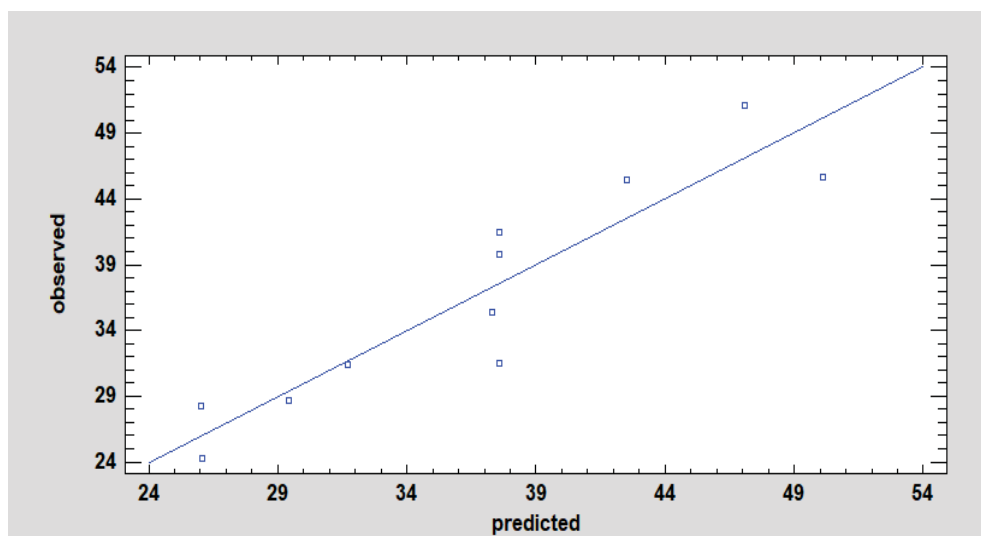
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A MASSA ESPECÍFICA APARENTE SATURADA



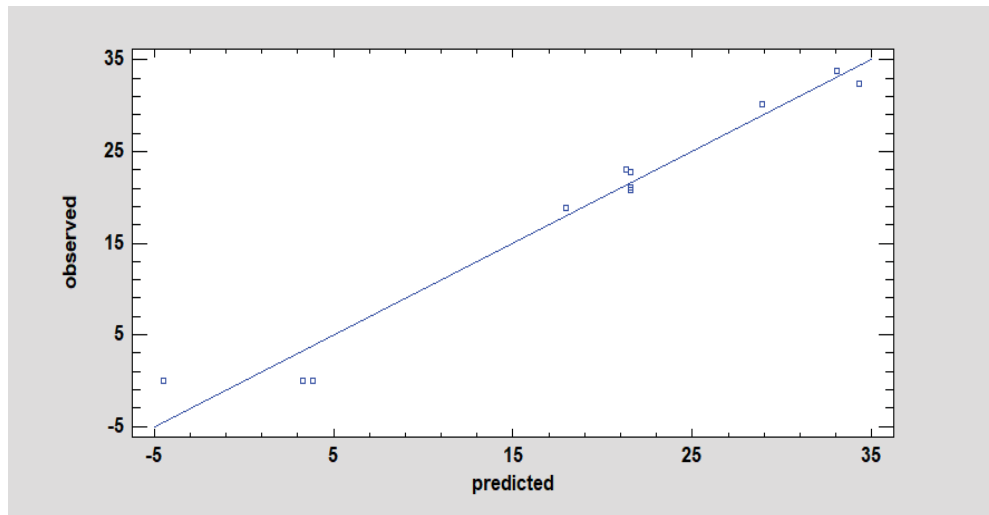
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 0%



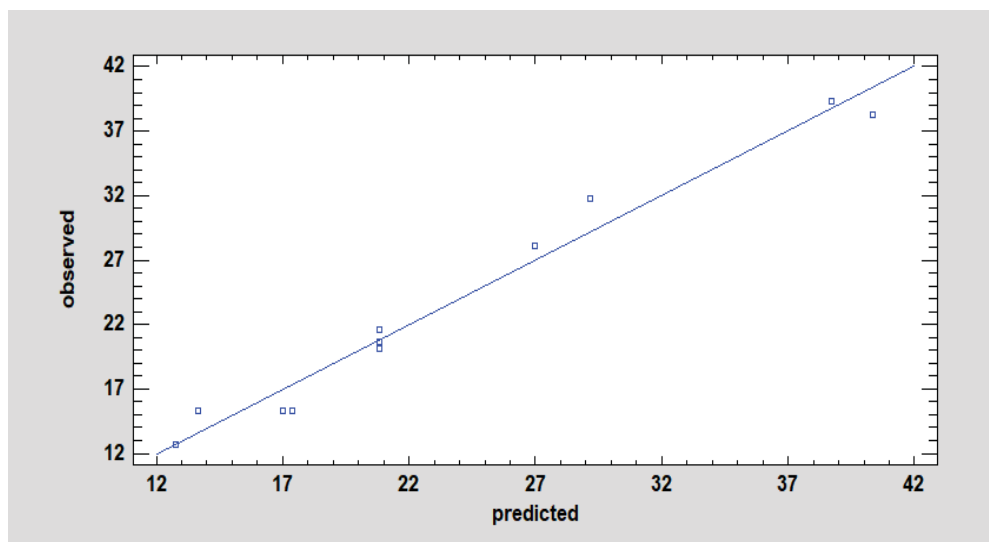
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A MOLHABILIDADE AR5S



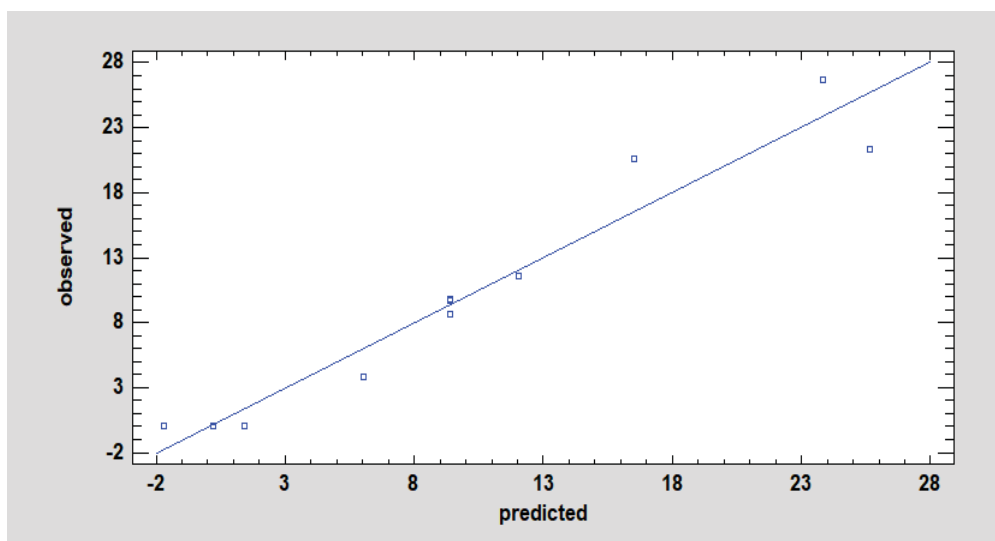
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A MOLHABILIDADE AR30S



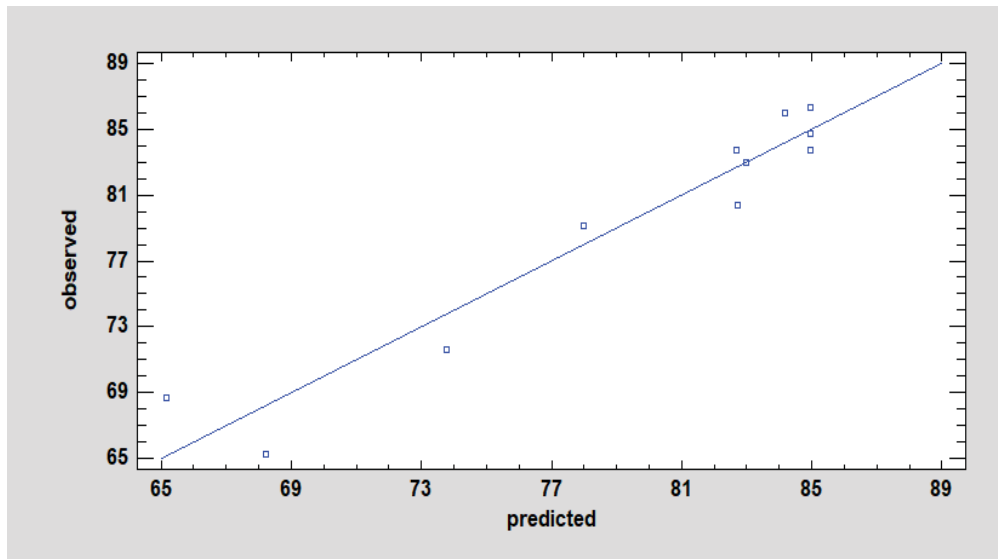
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A MOLHABILIDADE AT5S



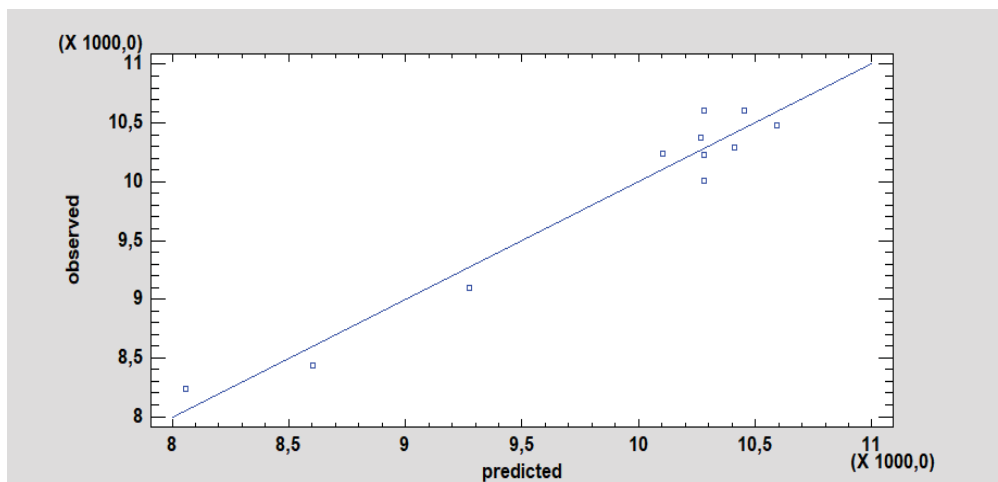
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A MOLHABILIDADE AT30S



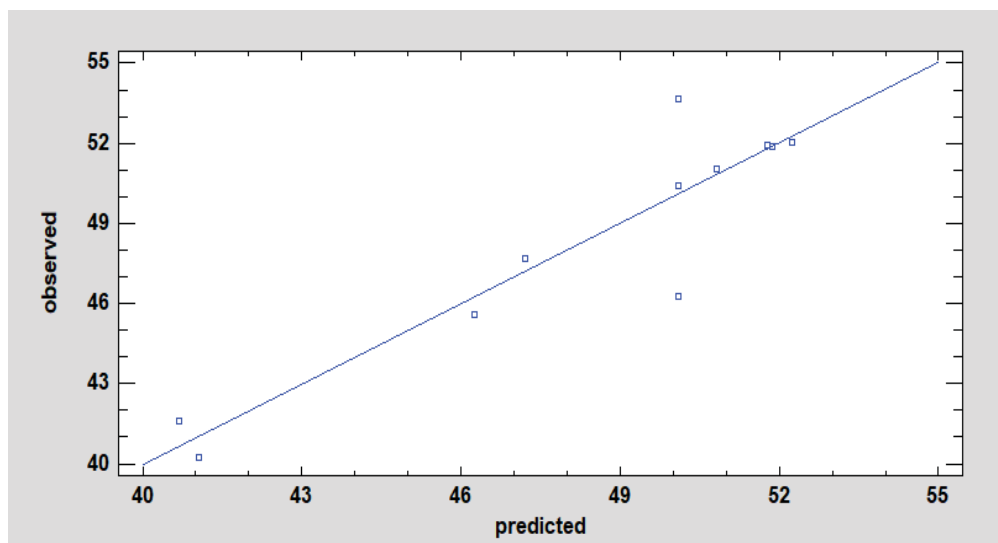
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA (MOR)



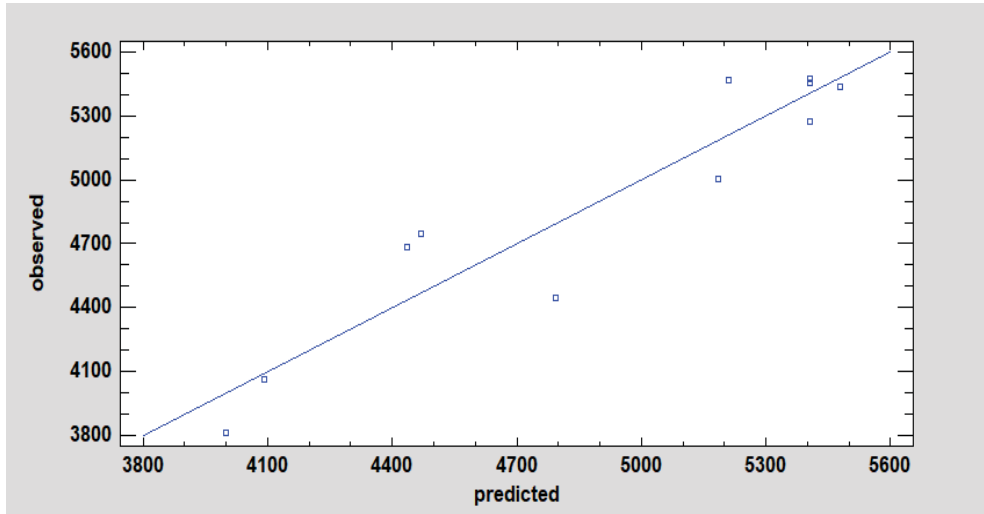
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA (MOE)



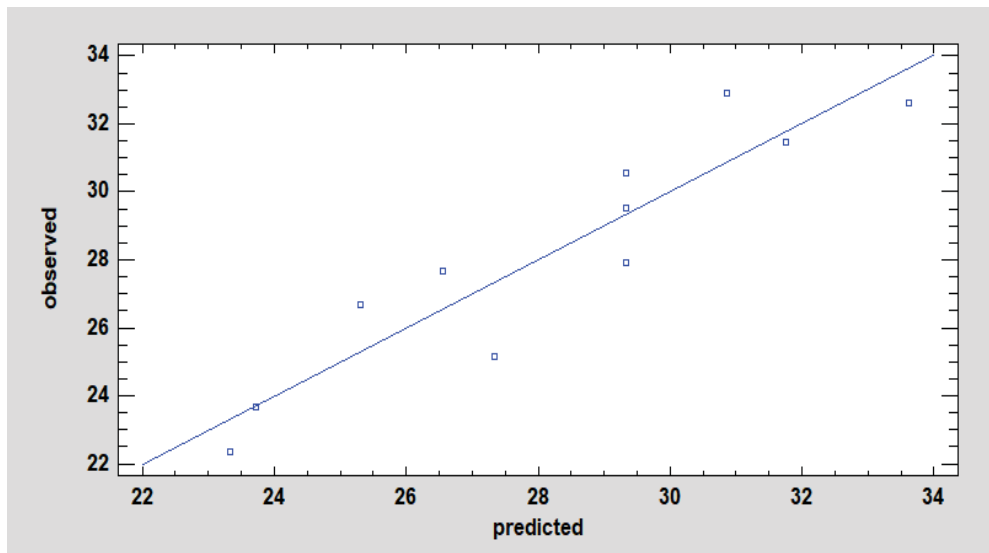
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MOR)



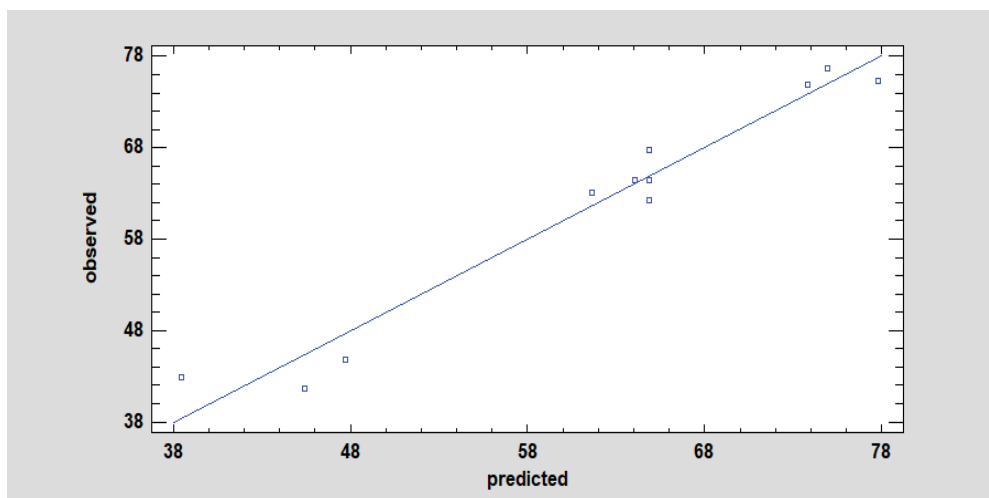
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MOE)



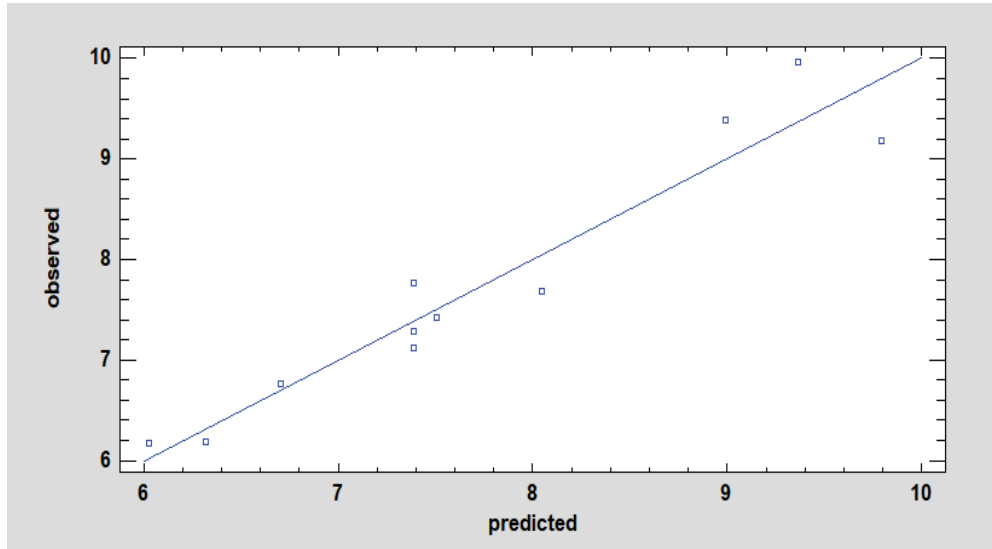
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA A DUREZA JANKA



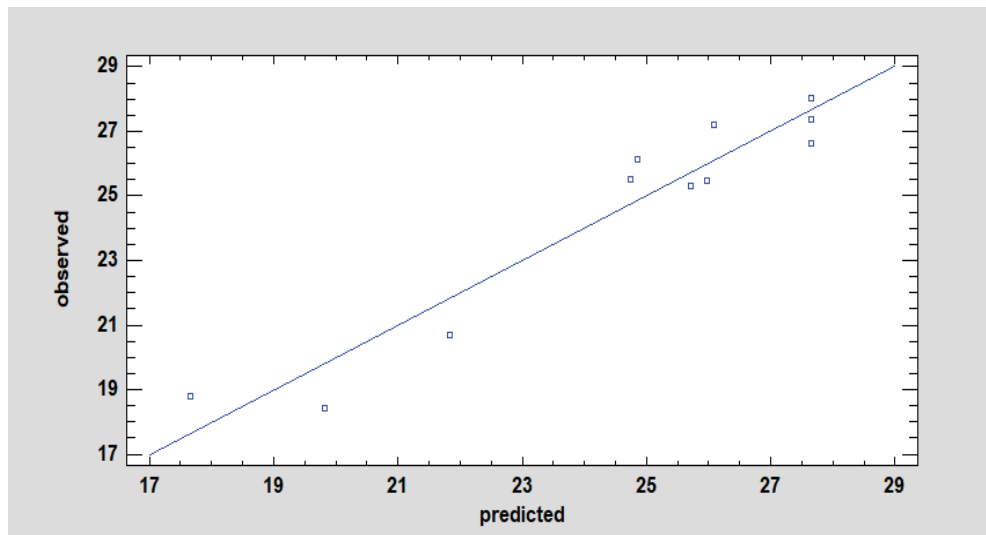
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA OS PARÂMETRO DE COR L*



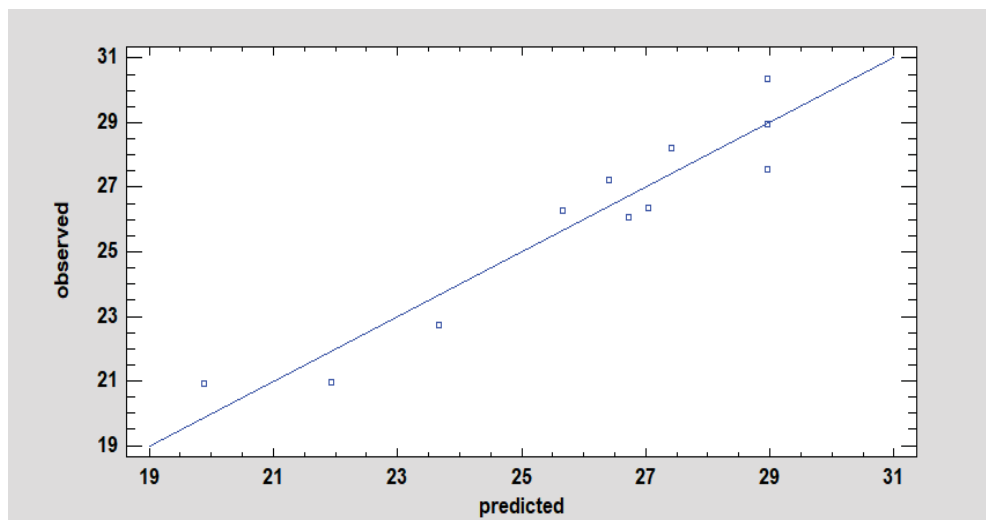
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA OS PARÂMETRO DE COR a*



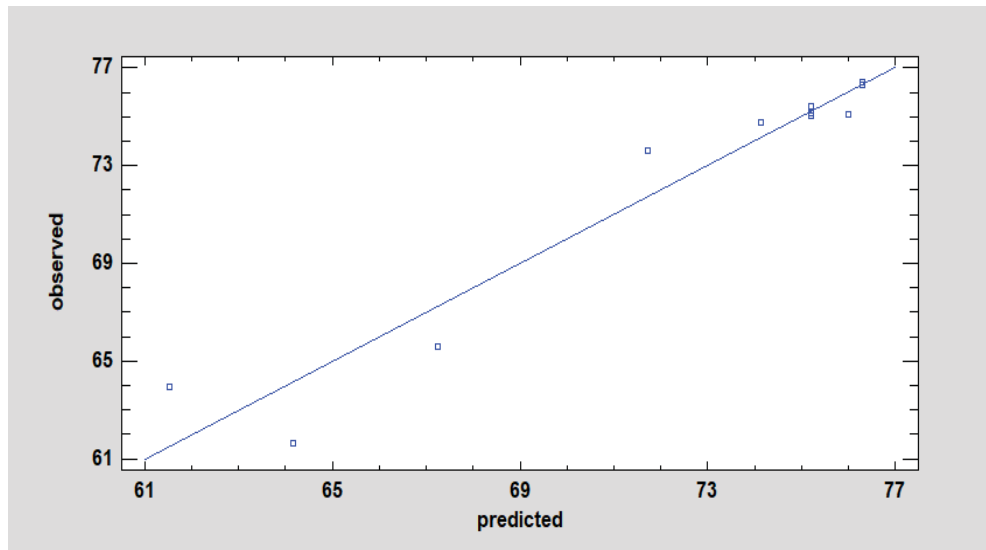
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA OS PARÂMETRO DE COR b^*



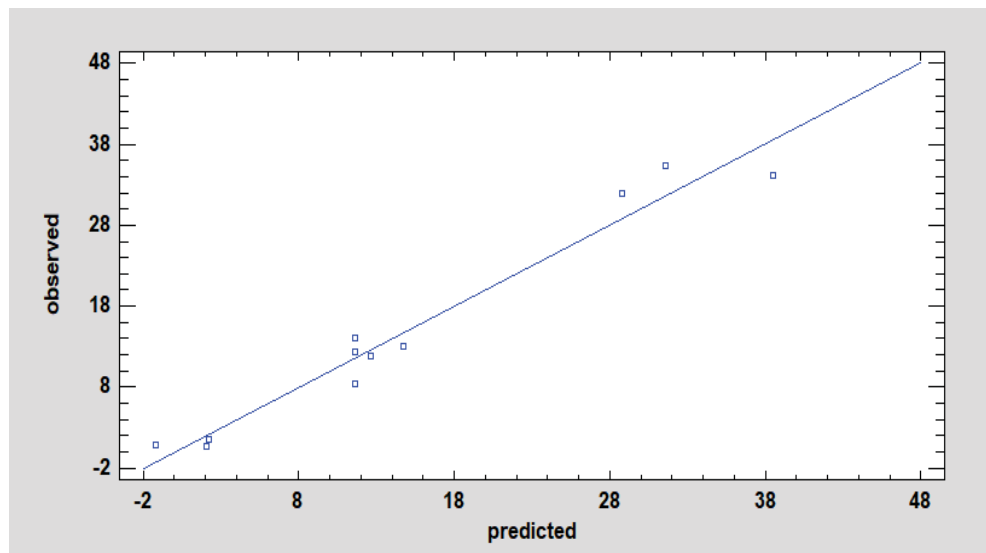
DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA OS PARÂMETRO DE COR C^*



DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA OS PARÂMETRO DE COR h^*



DADOS EXPERIMENTAIS X DADOS PREVISTOS PARA OS PARÂMETRO DE COR
 ΔE



APÊNDICE 3

O Apêndice 3 refere-se as tabelas de ANOVA com todos os parâmetros.

TABELA DE ANOVA PARA PERDA DE MASSA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Teste F	Tabelado	razão
SQR	84,06849631	5	16,81369926	21,96729	5,050329	4,349674
SQres	3,826986033	5	0,765397207			
SQT	87,89548235	10	8,789548235			
SQep	0,465710887	2	0,232855444	4,811676	19,16429	0,251075
SQfaj	3,361275145	3	1,120425048			
R ²	0,95645981	R	0,977987633	p-valor	0,0021	

TABELA DE ANOVA PARA O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Teste F	Tabelado	razão
SQR	27,76947	5	5,553893534	15,25021	5,050329	3,019647
SQres	1,820923	5	0,364184642			
SQT	29,59039	10	2,959039088			
SQep	0,66971	2	0,334855239	1,145981	19,16429	0,059798
SQfaj	1,151213	3	0,383737577			
R ²	0,938462	R	0,968742663	p-valor	0,0048	

TABELA DE ANOVA PARA O INCHAMENTO LINEAR RADIAL DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	11,49654	5	2,299308588	8,270834	5,050329	1,637682
SQres	1,39001	5	0,278002019			
SQT	12,88655	10	1,288655304			
SQep	0,013496	2	0,00674806	67,99554	19,16429	3,548033
SQfaj	1,376514	3	0,458837992			
R ²	0,892135	R	0,944528899	p-valor	0,0184	

TABELA DE ANOVA PARA O INCHAMENTO LINEAR TANGENCIAL DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Teste F	Tabelado	razão
SQR	17,93523085	5	3,587046171	17,31538	5,050329	3,428564
SQres	1,035797939	5	0,207159588			
SQT	18,97102879	10	1,897102879			

SQep	0,061444546	2	0,030722273	10,57163	19,16429	0,551632
SQfaj	0,974353393	3	0,324784464			
R ²	0,945401067	R	0,972317369	p-valor	0,0035	

TABELA DE ANOVA PARA O INCHAMENTO LINEAR LONGITUDINAL DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	0,032977	5	0,006595329	0,829837	5,050329	0,164313
SQres	0,039739	5	0,00794774			
SQT	0,072715	10	0,007271535			
SQep	0,011294	2	0,005647015	1,679039	19,16429	0,087613
SQfaj	0,028445	3	0,009481557			
R ²	0,453503	R	0,673426488	p-valor	0,5786	

TABELA DE ANOVA PARA O INCHAMENTO LINEAR VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	34,58389	5	6,916778628	28,70122	5,050329	5,68304
SQres	1,204962	5	0,240992483			
SQT	35,78886	10	3,578885556			
SQep	0,016033	2	0,008016475	49,43692	19,16429	2,579637
SQfaj	1,188929	3	0,396309823			
R ²	0,966331	R	0,983021541	p-valor	0,0011	

TABELA DE ANOVA PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE RADIAL DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	0,002048	5	0,000409631	1,988883	5,050329	0,393812
SQres	0,00103	5	0,00020596			
SQT	0,003078	10	0,000307796			
SQep	9,14E-05	2	4,56815E-05	6,847698	19,16429	0,357315
SQfaj	0,000938	3	0,000312813			
R ²	0,665427	R	0,815736965	p-valor	0,2343	

TABELA DE ANOVA PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE TANGENCIAL DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	0,011393	5	0,002278631	13,11481	5,050329	2,596823
SQres	0,000869	5	0,000173745			
SQT	0,012262	10	0,001226188			
SQep	3,35E-05	2	1,67423E-05	16,62935	19,16429	0,867726

SQfaj	0,000835	3	0,000278413			
R ²	0,929152	R	0,963925526	p-valor	0,0067	

TABELA DE ANOVA PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE LONGITUDINAL DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Teste F	Tabelado	razão
SQR	0,000231	5	4,61869E-05	0,496399	5,050329	0,09829
SQres	0,000465	5	9,30439E-05			
SQT	0,000696	10	6,96154E-05			
SQep	0,000188	2	9,42126E-05	0,979326	19,16429	0,051102
SQfaj	0,000277	3	9,22648E-05			
R ²	0,331729	R	0,575959246	p-valor	0,7698	

TABELA DE ANOVA PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	0,027326	5	0,005465273	6,218137	5,050329	1,231234
SQres	0,004395	5	0,000878925			
SQT	0,031721	10	0,003172099			
SQep	0,000234	2	0,000117226	11,8295	19,16429	0,617268
SQfaj	0,00416	3	0,001386724			
R ²	0,86146	R	0,928148748	p-valor	0,0327	

TABELA DE ANOVA PARA ANISOTROPIA DE INCHAMENTO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	0,102849	5	0,020569864	1,6349	5,050329	0,323722
SQres	0,062909	5	0,012581724			
SQT	0,165758	10	0,016575794			
SQep	0,000435	2	0,000217528	95,73279	19,16429	4,995373
SQfaj	0,062474	3	0,020824522			
R ²	0,620479	R	0,787704883	p-valor	0,3047	

TABELA DE ANOVA PARA A TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Teste F	Tabelado	razão
SQR	179,0655	5	35,81309312	6,153217	5,050329	1,21838
SQres	29,10111	5	5,820222304			
SQT	208,1666	10	20,81665771			
SQep	2,77085	2	1,385425023	6,335062	19,16429	0,330566
SQfaj	26,33026	3	8,776753824			
R ²	0,860203	R	0,927471168	p-valor	0,0339	

TABELA DE ANOVA PARA A EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	1518,384	5	303,676793	28,70122	5,050329	5,68304
SQres	52,90311	5	10,58062264			
SQT	1571,287	10	157,1287078			
SQep	0,703916	2	0,351958248	49,43692	19,16429	2,579637
SQfaj	52,1992	3	17,39973223			
R ²	0,966331	R	0,983021541	p-valor	0,0011	

TABELA– TABELA DE ANOVA PARA MASSA ESPECÍFICA APARENTE BÁSICA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	0,003438607	5	0,000687721	9,379722	5,050329	1,85725
SQres	0,0003666	5	7,332E-05			
SQT	0,003805207	10	0,000380521			
SQep	0,000135237	2	6,76187E-05	1,140527	19,16429	0,059513
SQfaj	0,000231363	3	7,71209E-05			
R ²	0,903658303	R	0,950609438	p-valor	0,0141	

TABELA 52 – TABELA DE ANOVA PARA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SATURADA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	0,012976	5	0,002595107	2,133834	5,050329	0,422514
SQres	0,006081	5	0,001216171			
SQT	0,019056	10	0,001905639			
SQep	0,0021	2	0,001049904	1,26394	19,16429	0,065953
SQfaj	0,003981	3	0,001327015			
R ²	0,680902	R	0,82516791	p-valor	0,2126	

TABELA DE ANOVA PARA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SATURADA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	0,022279	5	0,004455869	15,27949	5,050329	3,025445
SQres	0,001458	5	0,000291624			
SQT	0,023737	10	0,002373746			
SQep	0,000242	2	0,000120954	3,351709	19,16429	0,174893
SQfaj	0,001216	3	0,000405404			
R ²	0,938573	R	0,968799783	p-valor	0,0048	

TABELA DE ANOVA PARA ÂNGULO DE CONTATO NA FACE RADIAL EM 5 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	629,1273	5	125,825458	5,555731	5,050329	1,100073
SQres	113,2393	5	22,64786636			
SQT	742,3666	10	74,23666216			
SQep	56,73834	2	28,36916856	0,663878	19,16429	0,034641
SQfaj	56,50099	3	18,83366489			
R ²	0,847462	R	0,920576838	p-valor	0,0415	

TABELA DE ANOVA PARA ÂNGULO DE CONTATO NA FACE RADIAL EM 30 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	1580,98	5	316,1959505	27,68943	5,050329	5,482698
SQres	57,09687	5	11,41937321			
SQT	1638,077	10	163,8076619			
SQep	2,169287	2	1,08464333	16,88038	19,16429	0,880825
SQfaj	54,92758	3	18,30919313			
R ²	0,965144	R	0,982417406	p-valor	0,0012	

TABELA DE ANOVA PARA ÂNGULO DE CONTATO NA FACE TANGENCIAL EM 5 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Teste F	Tabelado	razão
SQR	873,5754	5	174,7150703	36,93876	5,050329	7,314129
SQres	23,64929	5	4,729857706			
SQT	897,2246	10	89,72246399			
SQep	1,243278	2	0,621638776	12,01449	19,16429	0,62692
SQfaj	22,40601	3	7,468670327			
R ²	0,973642	R	0,986732857	p-valor	0,0006	

TABELA DE ANOVA PARA ÂNGULO DE CONTATO NA FACE TANGENCIAL EM 30 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Teste F	Tabelado	razão
SQR	806,2893	5	161,2578696	14,76655	5,050329	2,923878
SQres	54,60244	5	10,92048712			
SQT	860,8918	10	86,08917836			
SQep	0,930956	2	0,46547808	38,43466	19,16429	2,005535
SQfaj	53,67148	3	17,89049314			
R ²	0,936575	R	0,967767826	p-valor	0,0051	

TABELA DE ANOVA PARA FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE RUPTURA) DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	511,2113	5	102,2422573	12,56532	5,050329	2,48802
SQres	40,6843	5	8,136860242			
SQT	551,8956	10	55,18955879			

SQep	3,531617	2	1,765808333	7,013348	19,16429	0,365959
SQfaj	37,15268	3	12,38422818			
R ²	0,926283	R	0,96243577	p-valor	0,0073	

TABELA DE ANOVA PARA FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	7115999	5	1423199,883	19,68626	5,050329	3,898014
SQres	361470,4	5	72294,08643			
SQT	7477470	10	747746,9847			
SQep	187773	2	93886,47948	0,616693	19,16429	0,032179
SQfaj	173697,5	3	57899,15774			
R ²	0,951659	R	0,975529971		0,0026	

TABELA – TABELA DE ANOVA PARA COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE RUPTURA) DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	172,159	5	34,43180889	5,793821	5,050329	1,147217
SQres	29,71425	5	5,94284953			
SQT	201,8733	10	20,18732921			
SQep	27,51671	2	13,75835284	0,053241	19,16429	0,002778
SQfaj	2,197542	3	0,732513989			
R ²	0,852807	R	0,923475736	p-valor	0,0382	

TABELA DE ANOVA PARA COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	3153669	5	630733,7828	7,442527	5,050329	1,473672
SQres	423736,3	5	84747,26633			
SQT	3577405	10	357740,5246			
SQep	24580,8	2	12290,39792	10,82567	19,16429	0,564888
SQfaj	399155,5	3	133051,8453			
R ²	0,881552	R	0,938910031	p-valor	0,023	

TABELA DE ANOVA PARA DUREZA JANKA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	108,5021	5	21,70042445	6,185862	5,050329	1,224843
SQres	17,54034	5	3,5080679			
SQT	126,0425	10	12,60424617			
SQep	3,483921	2	1,741960482	2,68977	19,16429	0,140353
SQfaj	14,05642	3	4,685472845			
R ²	0,860838	R	0,92781348	p-valor	0,0336	

TABELA DE ANOVA PARA O PARÂMETRO L DE COR DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	1612,003	5	322,4005558	23,07729	5,050329	4,569462
SQres	69,85236	5	13,97047131			
SQT	1681,855	10	168,1855136			
SQep	15,30267	2	7,651337037	2,376477	19,16429	0,124005
SQfaj	54,54968	3	18,18322749			
R ²	0,958467	R	0,979013319	p-valor	0,0018	

TABELA DE ANOVA PARA O PARÂMETRO a* DE COR DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	14,92456	5	2,984911243	11,40446	5,050329	2,258162
SQres	1,308659	5	0,261731849			
SQT	16,23322	10	1,623321546			
SQep	0,228344	2	0,114172128	3,154053	19,16429	0,16458
SQfaj	1,080315	3	0,360104996			
R ²	0,919384	R	0,958845063	p-valor	0,0081	

TABELA DE ANOVA PARA O PARÂMETRO b* DE COR DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	124,7963	5	24,95926521	10,55606	5,050329	2,090172
SQres	11,82225	5	2,364449256			
SQT	136,6186	10	13,66185723			
SQep	3,720137	2	1,860068273	1,451938	19,16429	0,075763
SQfaj	8,10211	3	2,700703245			
R ²	0,913465	R	0,95575379	p-valor	0,011	

TABELA DE ANOVA PARA O PARÂMETRO C* DE COR DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	89,43407	5	17,88681359	9,493511	5,050329	1,879781
SQres	9,420547	5	1,884109454			
SQT	98,85462	10	9,885461524			
SQep	3,925474	2	1,962736839	0,933233	19,16429	0,048696
SQfaj	5,495074	3	1,831691198			
R ²	0,904703	R	0,951158772	p-valor	0,0137	

TABELA DE ANOVA PARA O PARÂMETRO h* DE COR DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
-----------	----	----	----	------	------	-------

SQR	281,8886	5	56,37772683	14,18708	5,050329	2,80914
SQres	19,86939	5	3,973877388			
SQT	301,758	10	30,17580211			
SQep	0,091725	2	0,045862387	143,7464	19,16429	7,500743
SQfaj	19,77766	3	6,592554056			
R ²	0,934155	R	0,966516719	p-valor	0,0056	

TABELA DE ANOVA PARA O PARÂMETRO ΔE DE COR DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADO TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Fcal	Ftab	razão
SQR	1646,891	5	329,3781336	23,78759	5,050329	4,710106
SQres	69,2332	5	13,84663998			
SQT	1716,124	10	171,6123868			
SQep	16,64167	2	8,320834834	2,106821	19,16429	0,109935
SQfaj	52,59153	3	17,53051007			
R ²	0,959657	R	0,97962096	p-valor	0,0017	

APÊNDICE 4

Esse Apêndice 4 demonstra os dados dos modelos e gráficos recalculados.

PERDA DE MASSA E TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS RECALCULADOS PARA PERDA DE MASSA E PARA O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO COM O AMBIENTE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamentos	T	t	PM	\widehat{PM}	Tue	\widehat{Tue}
	(°C)	(h)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	148,79	1,44	3,31	4,64	11,62	11,67
2	191,21	1,44	10,97	11,08	7,46	8,08
3	148,79	3,56	4,22	4,64	11,48	11,67
4	191,21	3,56	11,98	11,08	7,23	8,08
5	170	2,5	6,99	7,86	10,11	9,88
6	170	2,5	7,61	7,86	11,09	9,88
7	170	2,5	7,94	7,86	10,08	9,88
8	140	2,5	3,97	3,3	11,59	12,42
9	170	1	7,29	7,86	10,42	9,88
10	200	2,5	11,29	12,42	7,38	7,34
11	170	4	7,87	7,86	10,16	11,67
Testemunha	-	-	0	-	12,88	-

ANOVA RECALCULADA PARA PERDA DE MASSA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	Teste F	Tabelado	razão
SQR	83,9280294	1	83,92802939	51,59933	5,117355	10,0832
SQres	14,6388	9	1,626533333			
SQT	98,5668294	10	9,856682939			
SQep	10,8119063	6	1,801984384	0,707904	4,757063	0,148811
SQfaj	3,8268937	3	1,275631232			
R ²	0,85148351	R	0,922758639			

ANOVA RECALCULADA PARA T_{Ue} DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	SQ	Gl	MQ	F _{cal}	F _{tal}	razão
SQR	25,81018	1	25,81017737	61,44933	5,050329	12,16739
SQres	3,780214	9	0,420023723			
SQT	29,59039	10	2,959039088			
SQep	0,66971	6	0,111618413	9,289098	4,757063	1,952696

SQfaj	3,110503	3	1,036834344		
R ²	0,872249	R	0,93394251	p-valor	0

COEFICIENTES RECALCULADOS GERADOS PARA O MODELO DE PERDA DE MASSA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Coeficiente	Estimativa	Erro	Teste t	P-Valor
b0	7,58545	0,220021	34,4761	0
b1	3,22151	0,257997	12,4866	0

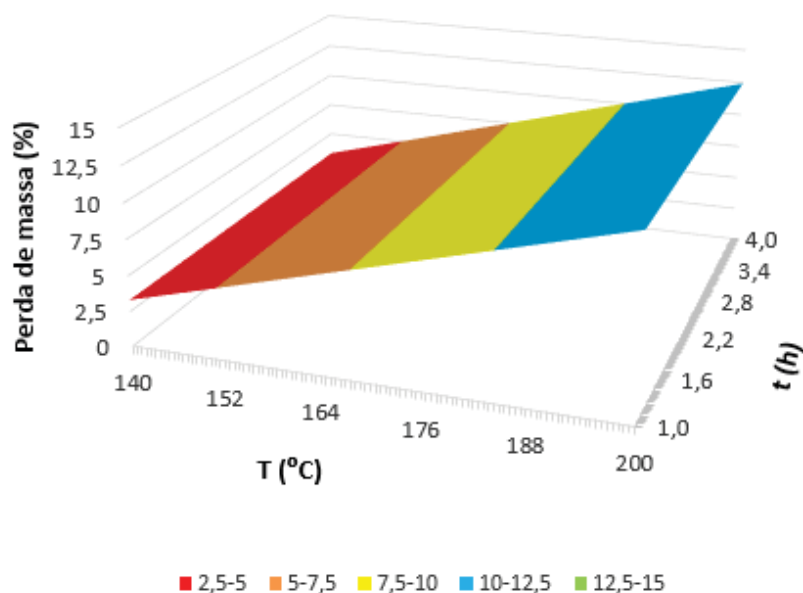
COEFICIENTES RECALCULADO GERADOS PARA O MODELO DE TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

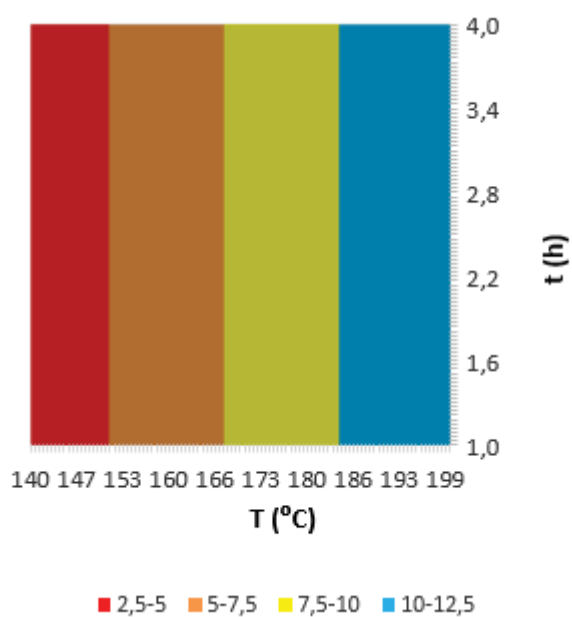
Coeficiente	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	7,85929	0,384534	20,4385	0
b1	3,22316	0,450906	7,14818	0,0001

$$\widehat{PM} = (7,5854) + (3,2215)T_1$$

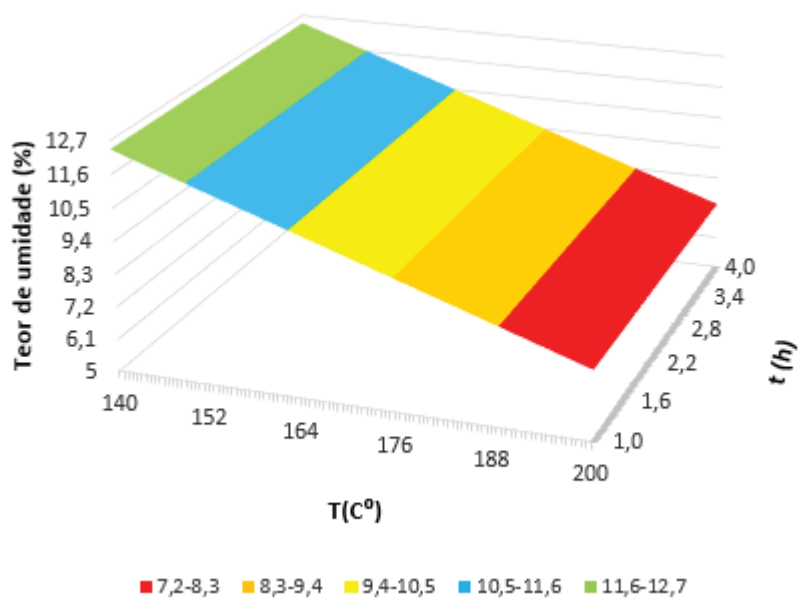
$$\widehat{Tue} = (7,8592) + (3,2231)T_1$$

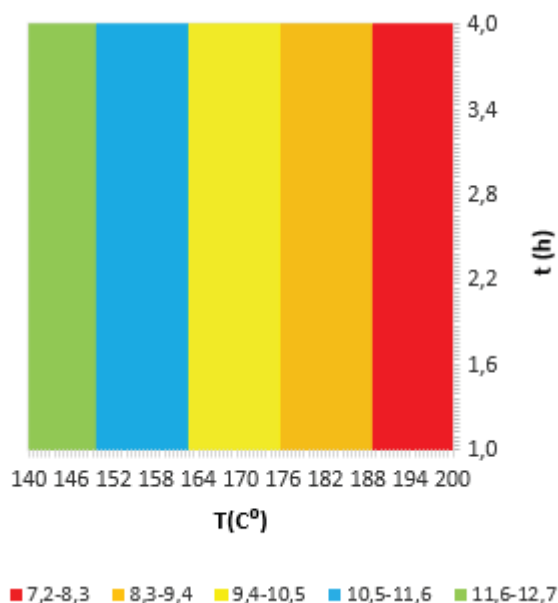
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL RECALCULADO GERADAS PARA A PERDA DE MASSA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVAS DE NÍVEL RECALCULADO PARA O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





INCHAMENTO LINEAR E VOLUMÉTRICO

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA INCHAMENTO LINEAR E INCHAMENTO VOLUMÉTRICO DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	IR	$\bar{I}R$	IT	$\bar{I}T$	IV	$\bar{I}V$
	(°C)	(H)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	148,79	1,44	6,41	5,91	8,96	8,27	12,52	12,16
2	191,21	1,44	3,30	3,63	5,29	5,49	7,83	8,06
3	148,79	3,56	5,72	5,91	7,55	8,27	11,97	12,16
4	191,21	3,56	2,77	3,63	4,85	5,49	7,12	8,06
5	170	2,5	4,99	4,77	6,93	6,88	10,33	10,11
6	170	2,5	4,88	4,77	6,64	6,88	10,30	10,11
7	170	2,5	4,83	4,77	6,62	6,88	10,16	10,11
8	140	2,5	6,09	6,38	8,76	8,85	12,48	13,01
9	170	1	5,32	4,77	8,15	6,88	10,83	10,11
10	200	2,5	3,93	3,16	5,40	4,92	7,63	7,21
11	170	4	4,23	4,77	6,58	6,88	10,03	10,11
Testemunha	-	-	6,43	-	9,43	-	15,09	-

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO LINEAR RADIAL DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
-----------	------------	------	---------	---------

b0	4,77155	0,158196	30,1623	0
b1	-1,14067	0,185501	-6,14912	0,0002

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO LINEAR TANGENCIAL DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	6,88455	0,188503	36,5223	0
b1	-1,39022	0,221039	-6,28948	0,0001

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE INCHAMENTO VOLUMÉTRICO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

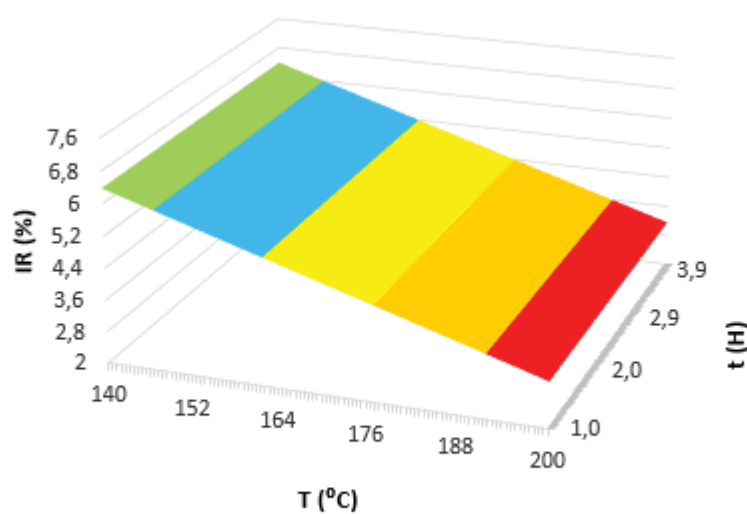
Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	10,1101	0,148125	68,2538	0
b1	-2,0499	0,173692	-11,8019	0

$$\hat{IR} = (4,77155) - (1,14067)T_1$$

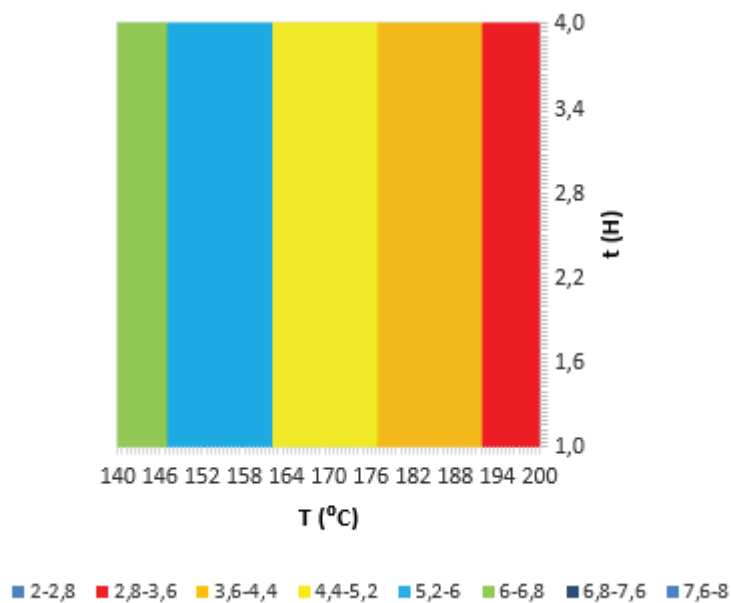
$$\hat{I\hat{T}} = (5,73802) - (1,15828)$$

$$\hat{IV} = (10,1101) - (2,0499)T_1$$

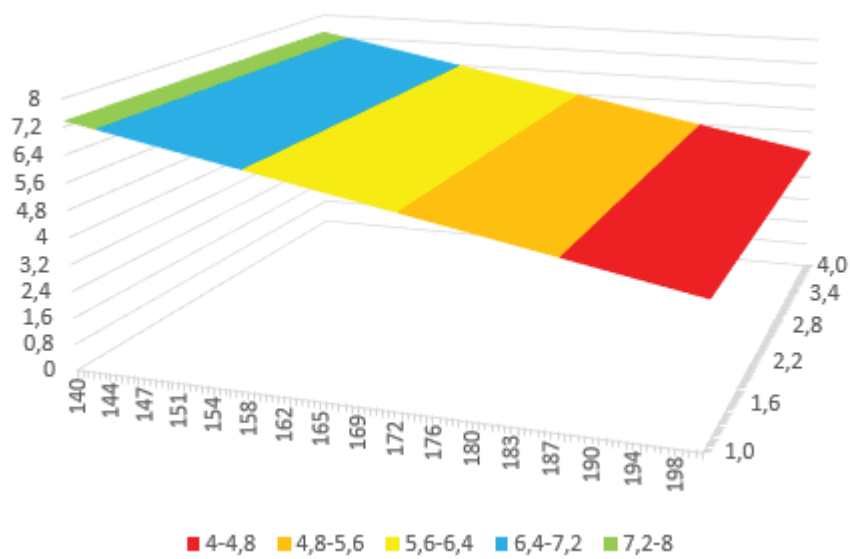
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO LINEAR RADIAL MÁXIMO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

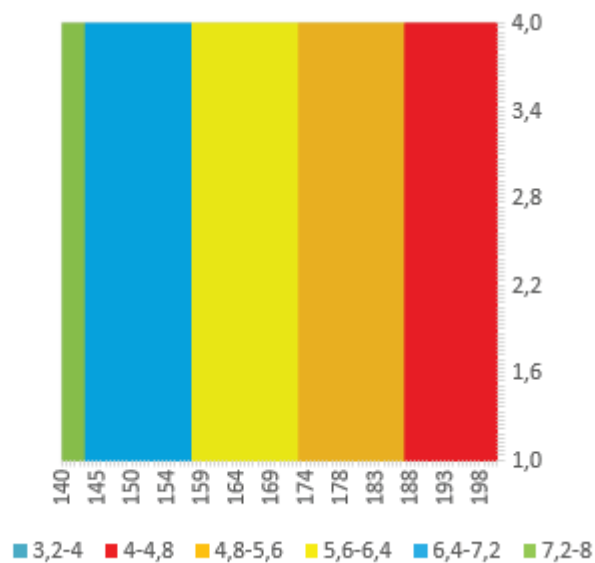


■ 2-2,8 ■ 2,8-3,6 ■ 3,6-4,4 ■ 4,4-5,2 ■ 5,2-6 ■ 6-6,8 ■ 6,8-7,6 ■ 7,6-8

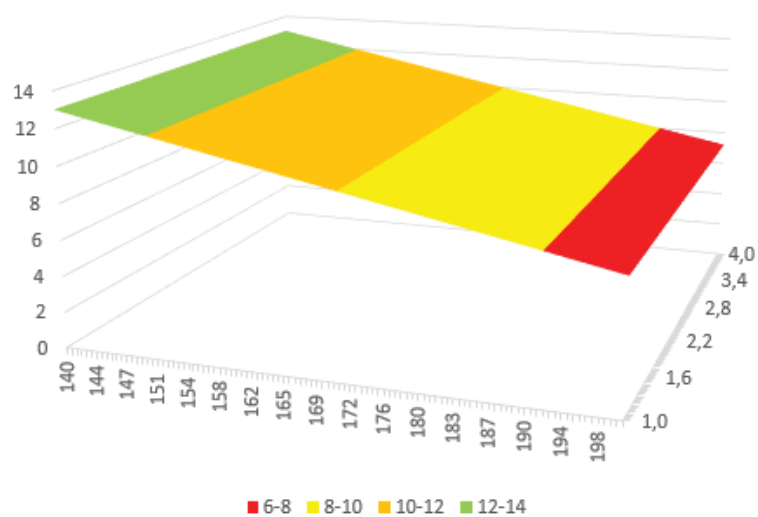


SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO LINEAR TANGENCIAL MÁXIMO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O INCHAMENTO VOLUMÉTRICO MÁXIMO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE

Tratamento	T	t	QT	\widehat{QT}	QV	\widehat{QV}
	(°C)	(H)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)
1	148,79	1,44	0,22	0,23	0,34	0,33
2	191,21	1,44	0,14	0,15	0,22	0,24
3	148,79	3,56	0,21	0,23	0,33	0,33
4	191,21	3,56	0,14	0,15	0,20	0,24

5	170	2,5	0,19	0,19	0,29	0,29
6	170	2,5	0,19	0,19	0,28	0,29
7	170	2,5	0,2	0,19	0,30	0,29
8	140	2,5	0,25	0,24	0,30	0,35
9	170	1	0,2	0,19	0,35	0,29
10	200	2,5	0,15	0,14	0,23	0,22
11	170	4	0,19	0,19	0,30	0,29
Testemunha	-	-	0,26	-	0,40	-

COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE TANGENCIAL DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	0,189091	0,0032954	57,3802	0
b1	-0,03643	0,0038642	-9,42696	0

COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	0,288182	0,00702751	41,0077	0
b1	-0,05277	0,00824049	-6,40332	0,0001

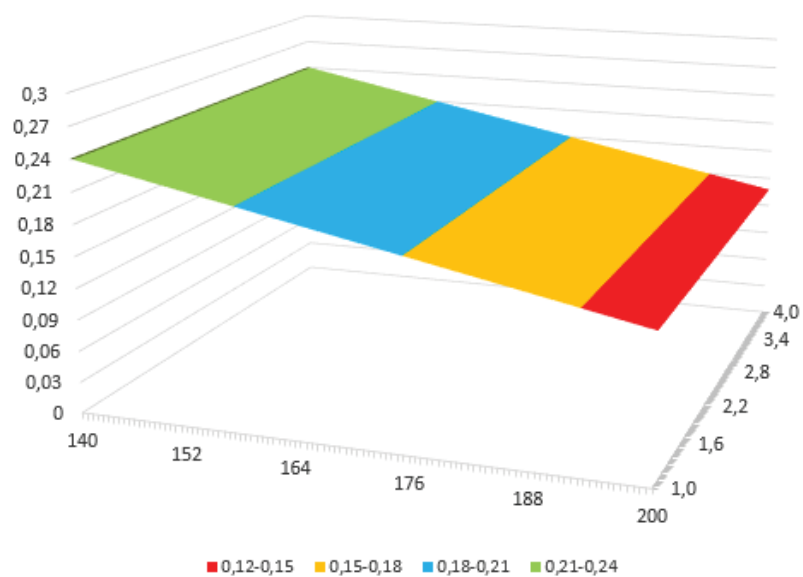
$$\widehat{QT} = (0,180991) - (0,03643)T_1$$

Equação 71

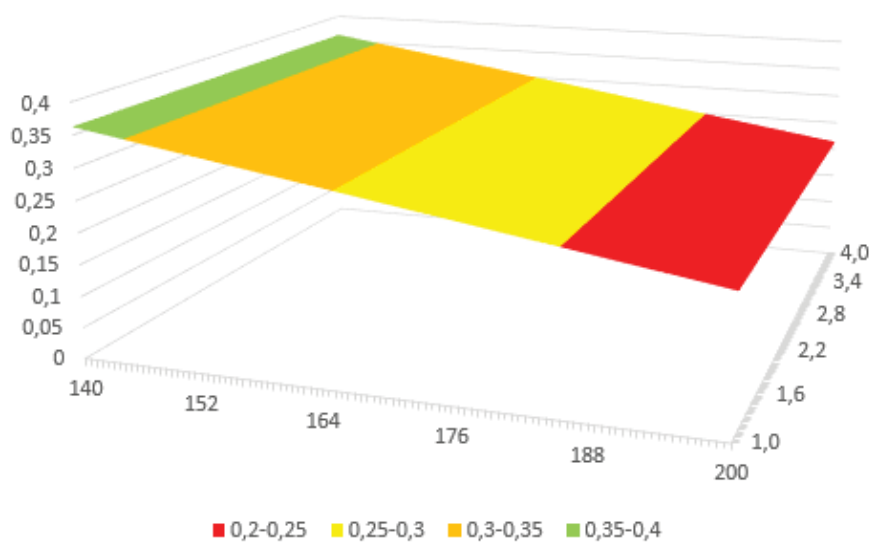
$$\widehat{QV} = (0,2881) - (0,05277)T_1$$

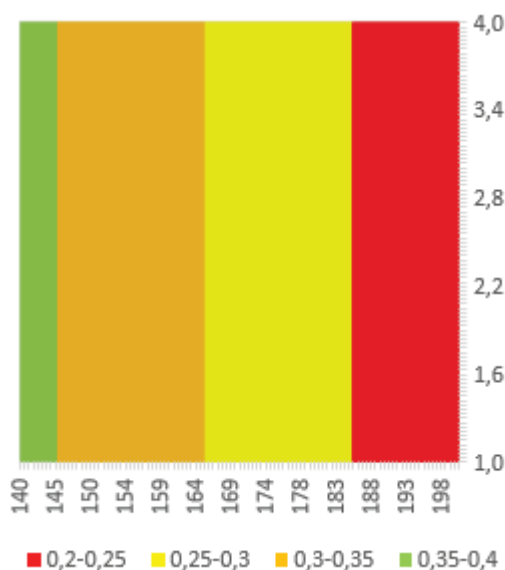
Equação 72

SUPERFÍCIE DE RESPOSTA RECALCULADA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE TANGENCIAL DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA O COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS RECALCULADOS PARA COEFICIENTE DE ANISOTROPIA, TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	TA	$\bar{T}A$	EAI	$\bar{E}AI$
	(°C)	(H)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	148,79	1,44	50,61	50,61	17,02	17,02
2	191,21	1,44	49,54	49,54	48,11	48,11
3	148,79	3,56	52,83	52,83	20,70	20,70
4	191,21	3,56	49,09	49,09	52,80	52,80
5	170	2,5	59,43	59,43	31,54	31,54
6	170	2,5	57,87	57,87	31,74	31,74
7	170	2,5	57,13	57,13	32,66	32,66
8	140	2,5	51,95	51,95	17,32	17,32
9	170	1	57,03	57,03	28,22	28,22
10	200	2,5	47,16	47,16	49,46	49,46
11	170	4	60,08	60,08	33,53	33,53
Testemunha	-	-	52,83		0,00	

COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
-----------	------------	------	---------	---------

b0	57,5047	1,03713	55,4459	0
b11	-4,97897	0,992977	-5,01418	0,0007

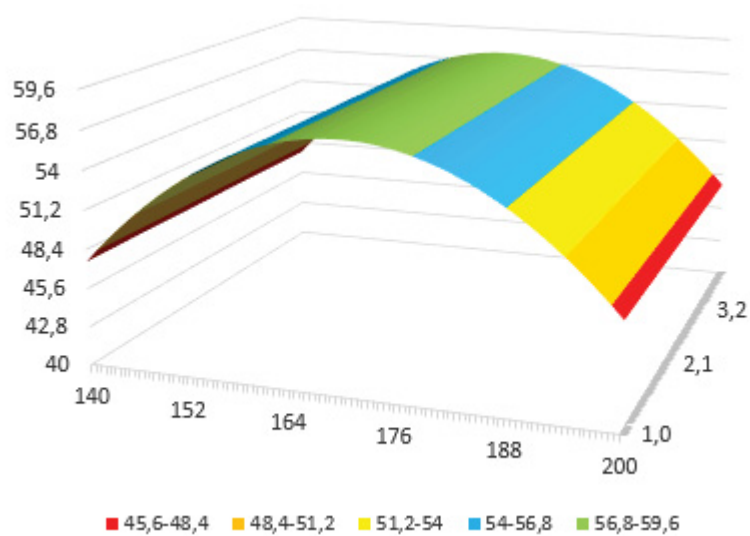
COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

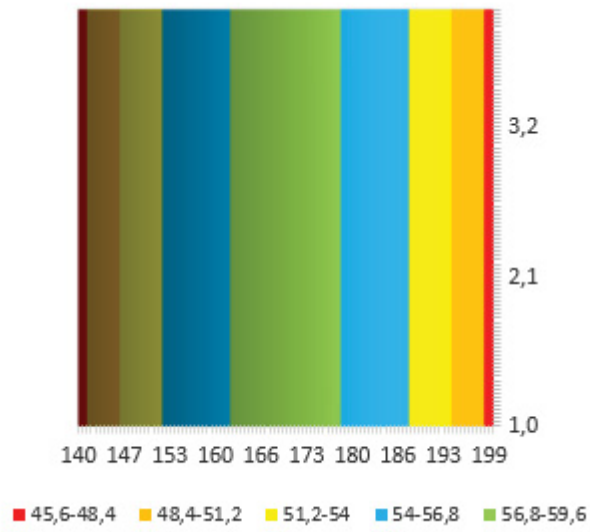
Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	33,0101	0,981482	33,6329	0
b1	13,5827	1,15089	11,8019	0

$$\hat{T\bar{A}} = (57,5047) - (4,97897)T_1^2$$

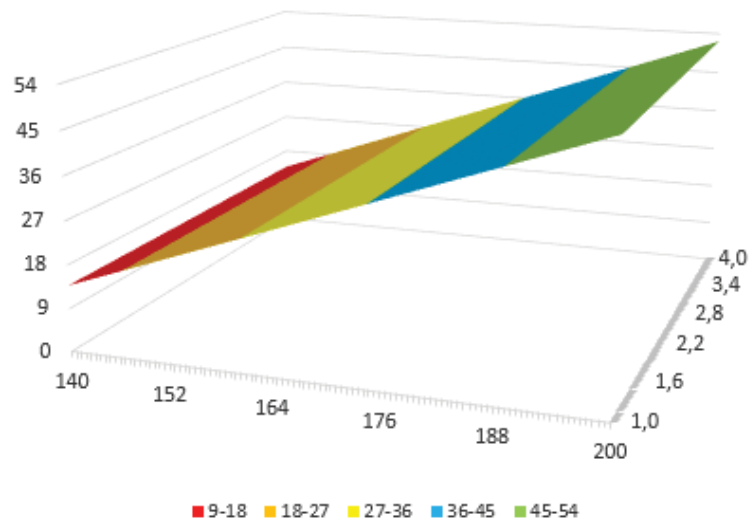
$$\hat{E\bar{A}i} = (33,0101) + (13,5827)T_1$$

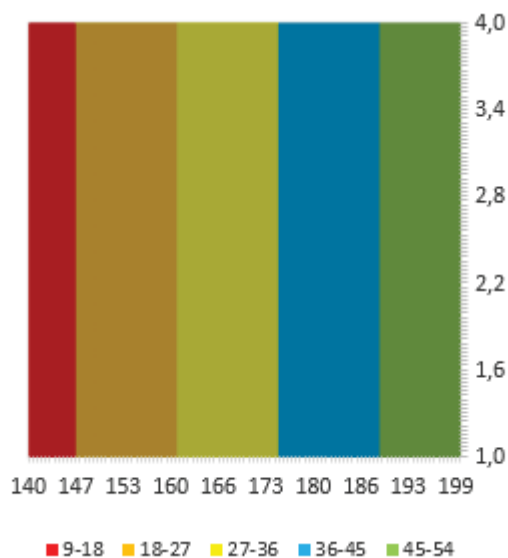
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL RECALCULADOS PARA A TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL RECALCULADOS PARA A EFICIÊNCIA ANTI-INCHAMENTO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





MASSA ESPECÍFICA

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	ME _b	\widehat{ME}_b	ME _{0%}	$\widehat{ME}_{0\%}$
	(°C)	(H)	(g/cm³)	(g/cm³)	(g/cm³)	(g/cm³)
1	148,79	1,44	0,49	0,48	0,55	0,57
2	191,21	1,44	0,48	0,48	0,50	0,49
3	148,79	3,56	0,50	0,51	0,56	0,57
4	191,21	3,56	0,45	0,46	0,45	0,49
5	170	2,5	0,52	0,51	0,56	0,57
6	170	2,5	0,51	0,51	0,59	0,57
7	170	2,5	0,50	0,51	0,58	0,57
8	140	2,5	0,49	0,49	0,57	0,56
9	170	1	0,49	0,49	0,56	0,57
10	200	2,5	0,46	0,46	0,45	0,44
11	170	4	0,50	0,49	0,57	0,57
Testemunha	-	-	0,53		0,58	

COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE BÁSICA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	0,508402	0,00454889	111,764	0
b1	-0,0124	0,00278562	-4,4518	0,0043
b11	-0,01685	0,00331555	-5,08142	0,0023
b22	-0,00963	0,00331555	-2,90505	0,0272
b12	-0,01077	0,00393946	-2,73508	0,034

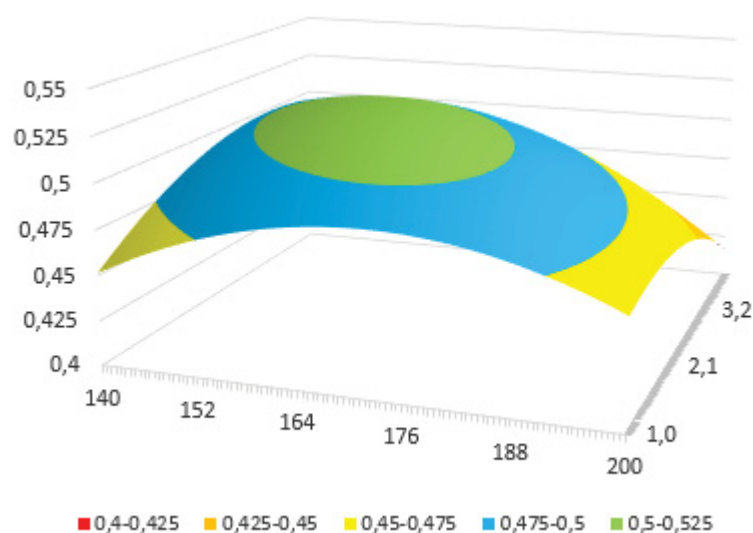
COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE MASSA ESPECÍFICA ANIDRA DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

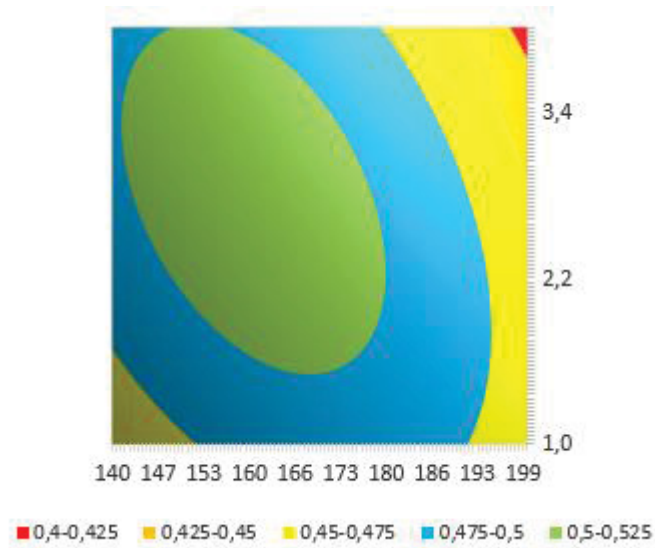
Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	0,565235	0,00833116	67,8458	0
b1	-0,04168	0,00701172	-5,94501	0,0003
b11	-0,0329	0,00797648	-4,12424	0,0033

$$\widehat{MEb} = (0,508402) - (0,0124)T_1 - (0,0168)T_1^2 - (0,0096)t_2^2 - (0,0108)T_1t_2$$

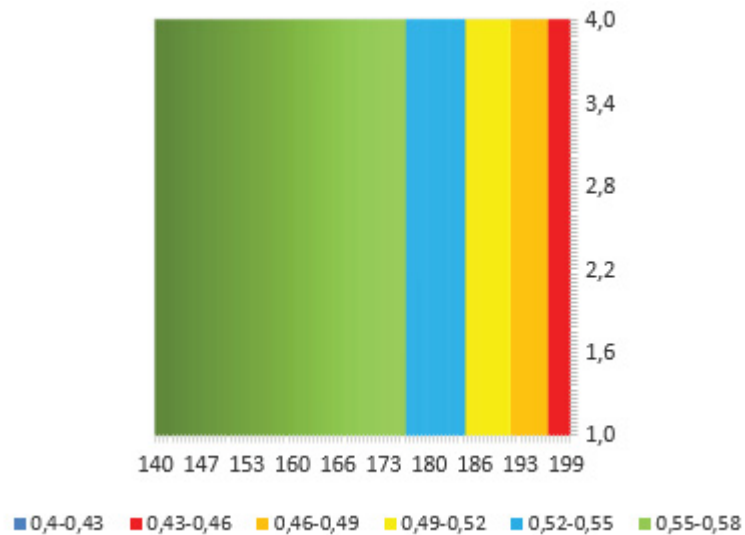
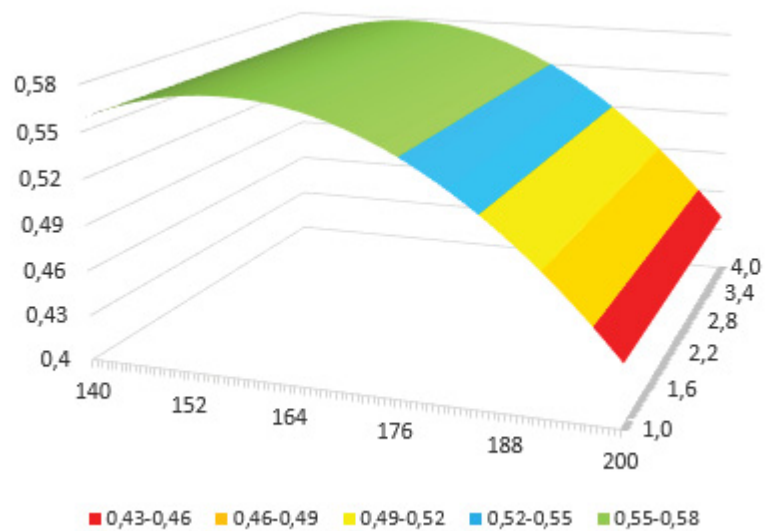
$$\widehat{ME}_{0\%} = (0,5652) - (0,0417)T_1 - (0,0329)T_1^2$$

SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A MASSA ESPECÍFICA APARENTE BÁSICA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





SUPERFÍCIE DE RESPOSTA GERADA E CURVA DE NÍVEL PARA A MASSA ESPECÍFICA ANIDRA DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



MOLHABILIDADE

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA MOLHABILIDADE (ÂNGULO DE CONTATO) DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Tratamento	T	t	AR5s	$\overline{AR5s}$	AR30s	$\overline{AR30s}$	AT5s	$\overline{AT5s}$	AT30s	$\overline{AT30s}$
	(°C)	(H)	°	°	°	°	°	°	°	°
1	148,79	1,44	24,28	28,12	0,00	4,73	12,67	11,31	0,00	0,52
2	191,21	1,44	45,44	45,16	30,14	32,15	31,74	30,19	20,58	19,88
3	148,79	3,56	28,72	28,12	0,00	4,73	15,31	18,39	0,00	0,52
4	191,21	3,56	51,08	45,16	33,74	32,15	39,29	37,26	26,72	19,88
5	170	2,5	31,53	36,64	22,77	18,44	20,09	21,36	8,61	10,20
6	170	2,5	41,51	36,64	20,83	18,44	20,68	21,36	9,73	10,20
7	170	2,5	39,74	36,64	21,14	18,44	21,65	21,36	9,85	10,20
8	140	2,5	28,24	24,59	0,00	-0,95	15,28	13,87	0,00	3,48
9	170	1	31,37	36,64	18,84	18,44	15,34	16,36	3,87	10,20
10	200	2,5	45,68	48,69	32,38	37,83	38,22	40,56	21,30	23,89
11	170	4	35,43	36,64	23,00	18,44	28,14	26,37	11,57	10,20
Testemunha	-	-	7,48		0,00		3,03		0,00	

COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE RADIAL A 5S DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	36,6387	1,27648	28,7029	0
b1	8,52244	1,49681	5,69374	0,0003

COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE RADIAL A 30S DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	18,4396	1,16595	15,815	0
b1	13,709	1,3672	10,0271	0

COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE TANGENCIAL A 5S DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
-----------	------------	------	---------	---------

b0	21,3648	0,893192	23,9196	0
b1	9,43834	0,751733	12,5554	0
b2	3,53662	0,751733	4,70462	0,0022
b11	2,92418	0,855166	3,41943	0,0111

COEFICIENTES GERADOS RECALCULADOS PARA O MODELO DE ÂNGULO DE CONTATO NA FACE TANGENCIAL A 30S DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	10,203	1,06156	9,61136	0
b1	9,67812	1,24479	7,77493	0

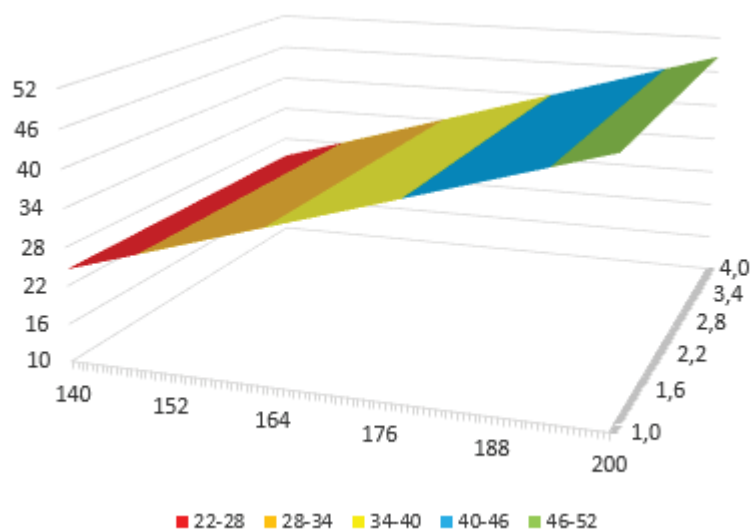
$$\widehat{AR5s} = (36,6387 + (8,52244)T_1$$

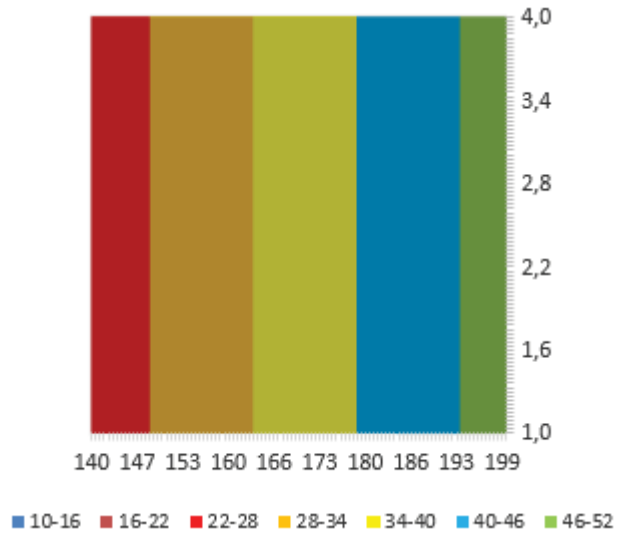
$$\widehat{AR30s} = (18,4396) + (13,709)T_1$$

$$\widehat{AT5s} = (21,3648) + (9,43834)T_1 + (3,53662)t_2 + (2,92418)T_1^2$$

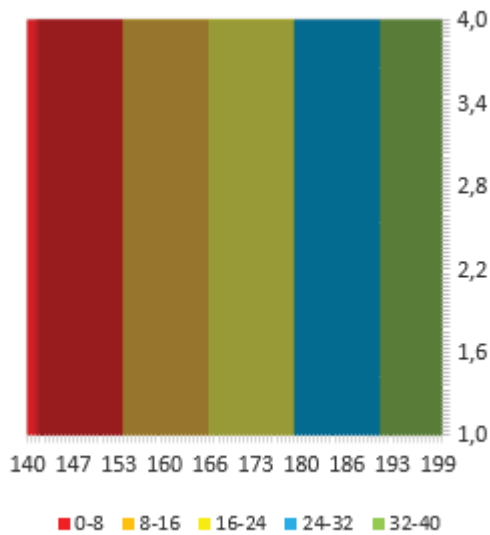
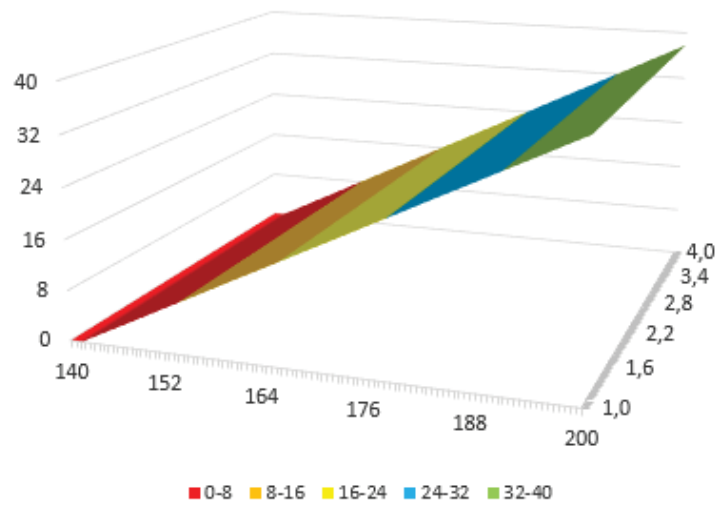
$$\widehat{AT30s} = (10,203) + (9,67812)T_1$$

SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL RECALCULADOS GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE RADIAL EM 5 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

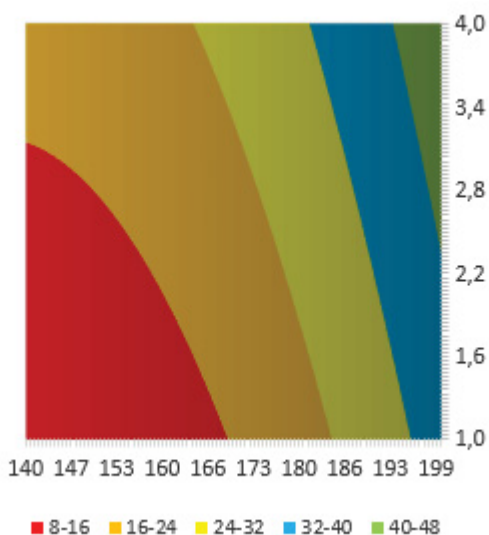
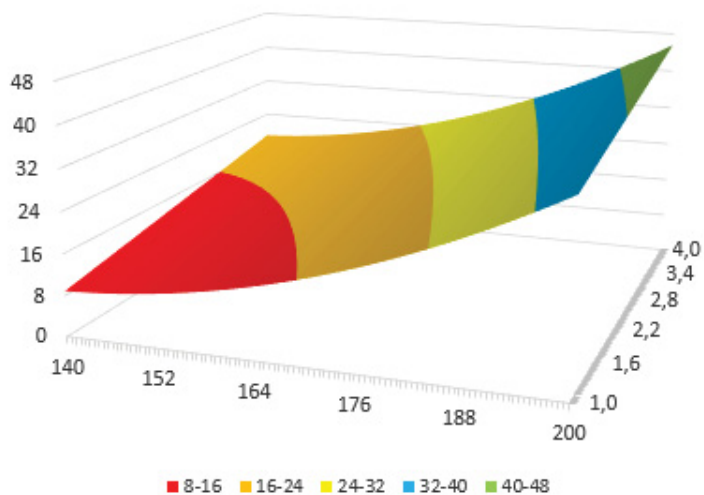




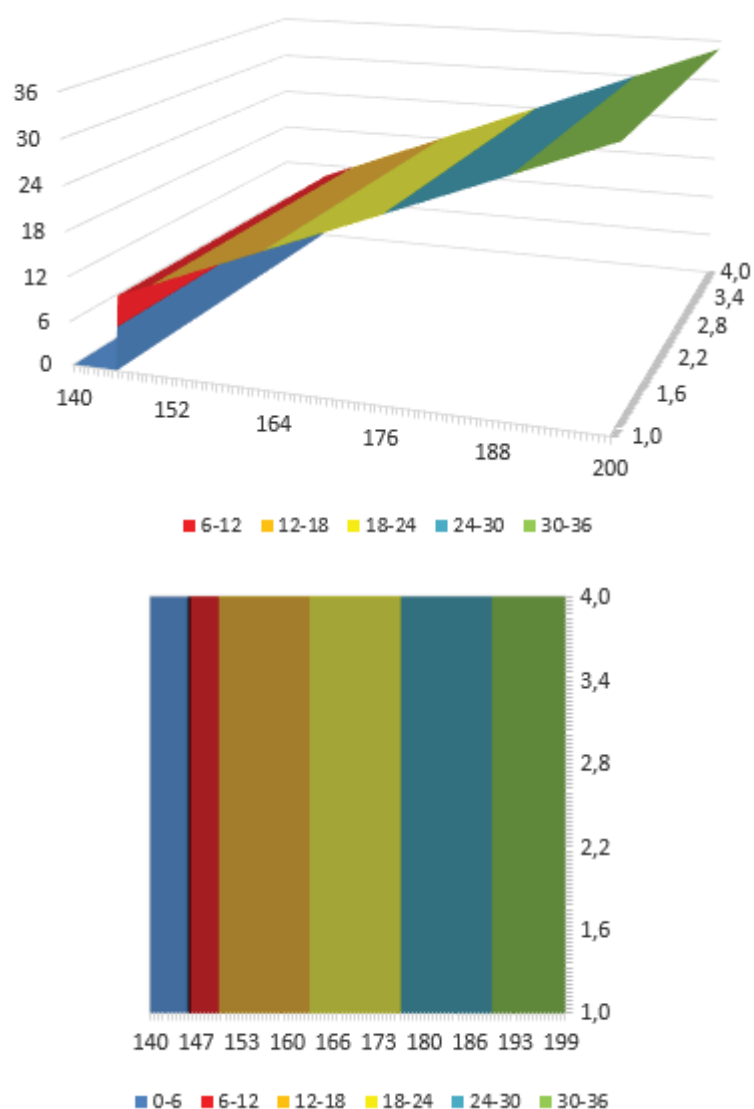
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL RECALCULADOS GERADAS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE RADIAL EM 30 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS RECALCULADOS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE TANGENCIAL EM 5 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS RECALCULADOS PARA O ÂNGULO DE CONTATO DA FACE TANGENCIAL EM 30 SEGUNDOS DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



PROPRIEDADES MECÂNICAS

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA, COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS E DUREZA JANKA DA MADEIRA RECALCULADOS DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Trat	T (°C)	t (H)	FE MPa	\widehat{FE} MPa	FMOE MPa	\widehat{FMOE} MPa	CP MPa	\widehat{CP} MPa	CMOE MPa	\widehat{CMOE} MPa	DJ MPa	\widehat{DJ} MPa
1	148,79	1,44	86,03	84,19	10287	10502	51,92	52,47	5468	5308	32,89	31,28
2	191,21	1,44	71,57	71,79	9096	8939	45,59	44,30	4687	4328	26,67	23,53
3	148,79	3,56	83,72	84,19	10482	10502	51,86	52,47	5003	5308	31,45	31,28
4	191,21	3,56	65,21	71,79	8438	8939	40,26	44,30	3808	4328	22,36	23,53
5	170	2,5	84,80	82,85	10611	10279	46,26	48,39	5478	5113	29,54	27,41

6	170	2,5	86,38	82,85	10225	10279	53,66	48,39	5461	5113	30,54	27,41
7	170	2,5	83,74	82,85	10005	10279	50,40	48,39	5278	5113	27,92	27,41
8	140	2,5	80,43	81,90	10374	10267	52,01	54,16	5438	5806	32,61	32,88
9	170	1	82,97	82,85	10607	10279	51,05	48,39	4448	4522	25,15	27,41
10	200	2,5	68,63	64,37	8241	8057	41,58	42,61	4064	4420	23,66	21,93
11	170	4	79,14	82,85	10238	10279	47,66	48,39	4747	4522	27,68	27,41
Test	-	-	87,2		12081		56,64		5480		34,89	

FONTE: O autor (2020).

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO FLEXÃO ESTÁTICA (MODULO DE RUPTURA) RECALCULADOS DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	82,8529	1,47328	56,2369	0
b1	-6,19847	1,23995	-4,99895	0,0011
b11	-4,86029	1,41056	-3,44565	0,0088

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO FLEXÃO ESTÁTICA (MODULO DE ELASTICIDADE) DA MADEIRA RECALCULADOS *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	10279	121,092	84,8859	0
b1	-781,437	101,914	-7,66762	0,0001
b11	-558,418	115,936	-4,81659	0,0013

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MODULO DE RUPTURA) RECALCULADOS DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	48,3864	0,831073	58,2215	0
b1	-4,08503	0,97452	-4,19184	0,0023

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MODULO DE ELASTICIDADE) RECALCULADOS DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	5113,27	156,924	32,5843	0
b1	-489,955	132,071	-3,70977	0,006

b22	-295,718	150,244	-1,96826	0,0846
-----	----------	---------	----------	--------

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DE DUREZA JANKA RECALCULADOS DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	28,2243	0,533826	52,8717	0
b1	-3,49697	0,625966	-5,58651	0,0003

$$\widehat{FE} = (82,8529) - (6,19847)T_1 - (4,86029)T_1^2$$

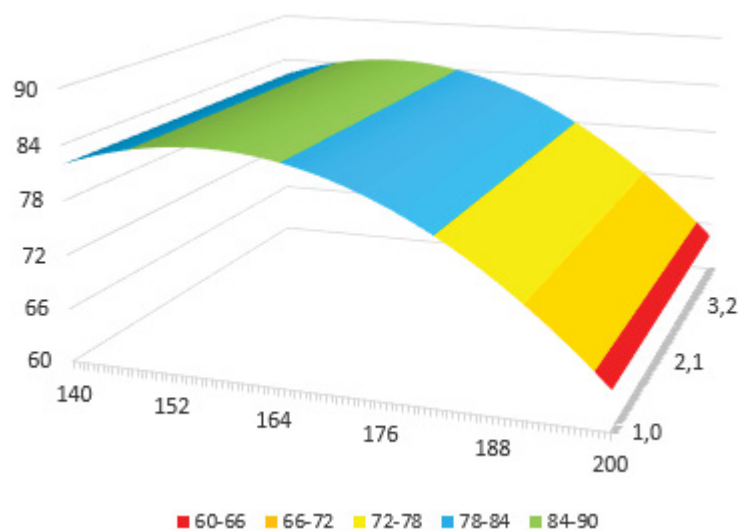
$$\widehat{FMOE} = (10279) - (781,437)T_1 - (558,418)T_1^2$$

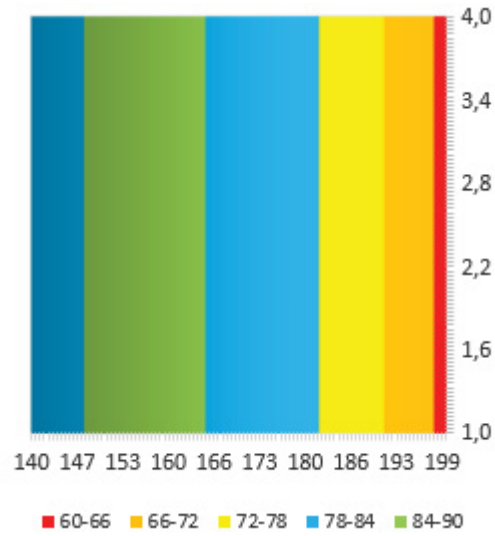
$$\widehat{CP} = (48,3864) - (4,08503)T_1$$

$$\widehat{CMOE} = (5113) - (489,955)T_1 - (295,718)t_2^2$$

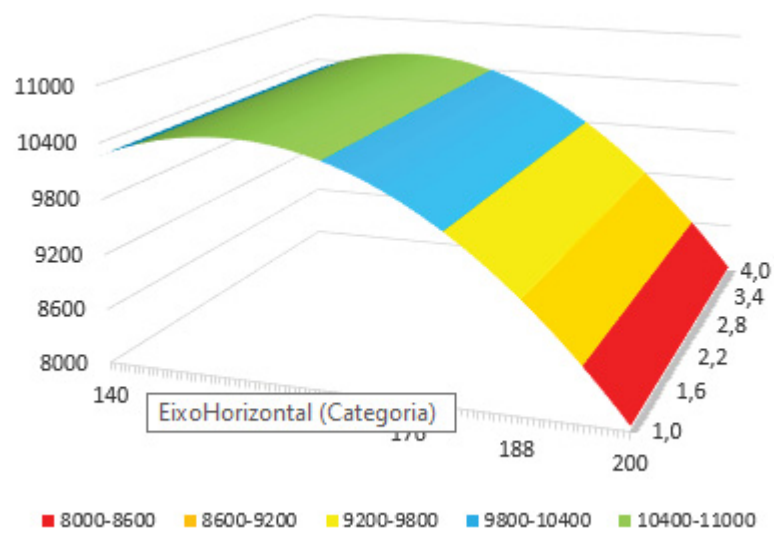
$$\widehat{DJ} = (28,2243) - (3,49697)T_1$$

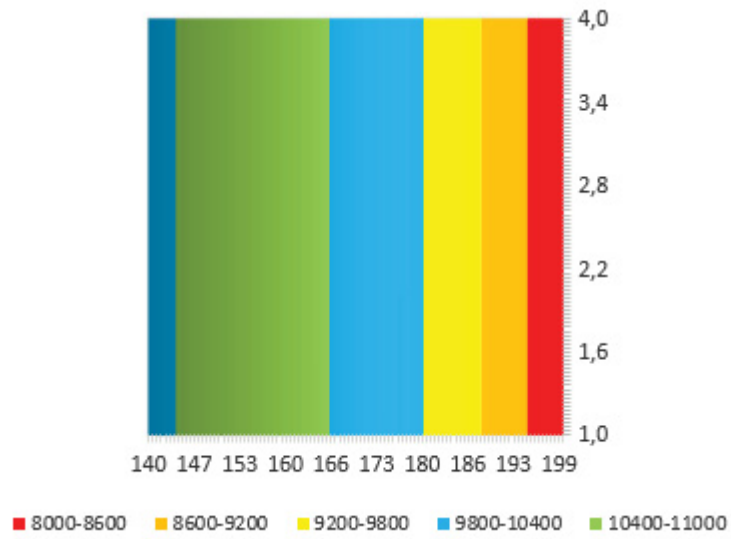
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE RUPTURA) DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



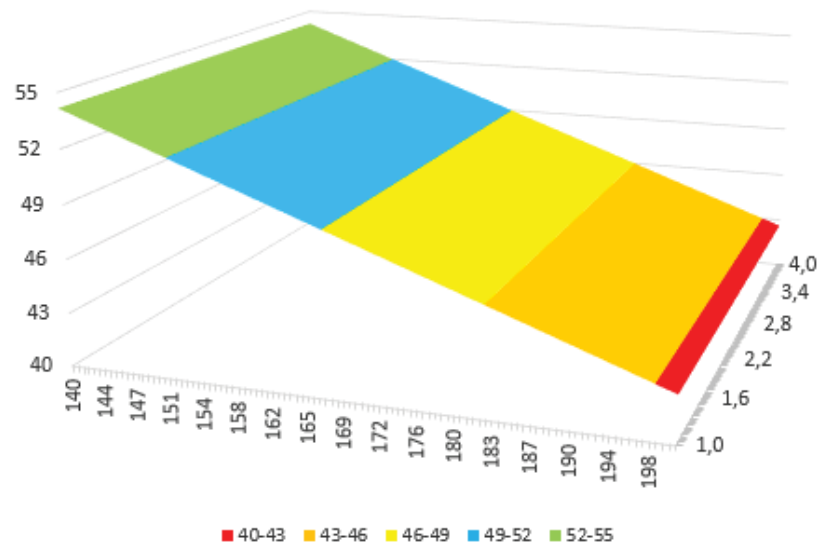


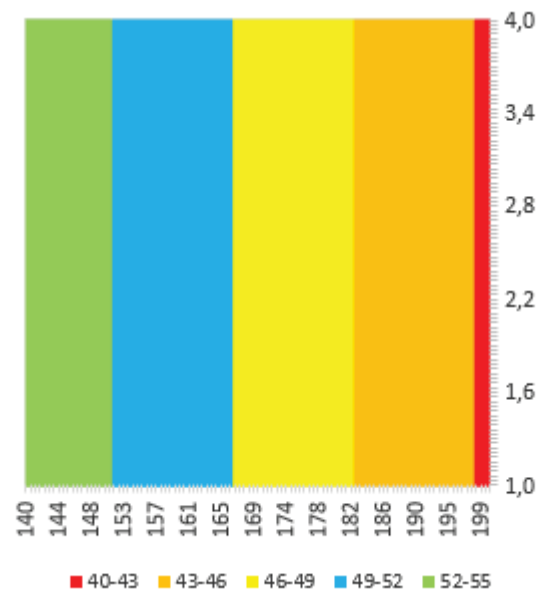
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A FLEXÃO ESTÁTICA (MÓDULO DE ELASTICIDADE) DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



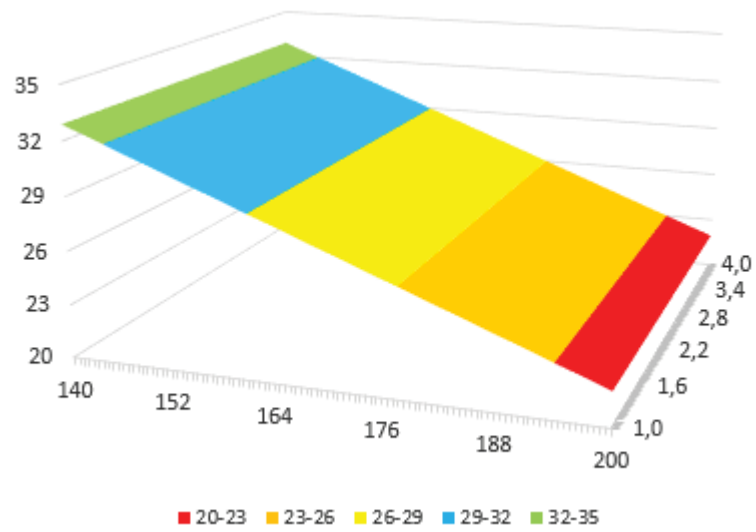


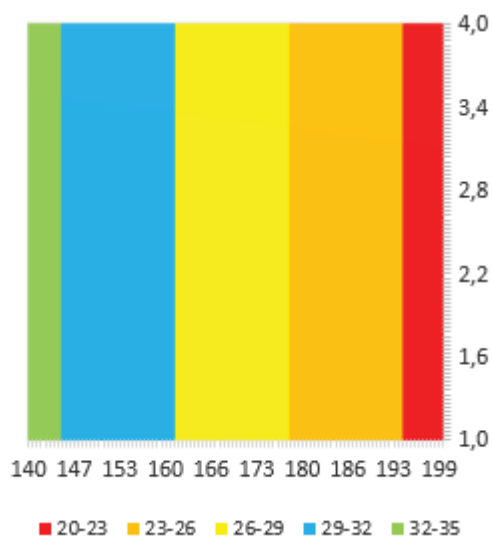
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS (MÓDULO DE RUPTURA) DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA A DUREZA JANKA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





COLORIMETRIA

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS PARA MOLHABILIDADE (ÂNGULO DE CONTATO) DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Trat	T	t	L*	\hat{L}^*	a*	\hat{a}^*	b*	\hat{b}^*	C*	\hat{C}^*	h*	\hat{h}^*
	(°C)	(H)										
1	148,79	1,44	76,72	75,55	6,18	6,39	25,32	26,50	26,07	27,24	76,29	76,55
2	191,21	1,44	44,77	47,78	9,39	9,05	20,70	21,21	22,73	23,16	65,61	66,10
3	148,79	3,56	74,89	75,55	6,77	6,39	25,46	26,50	26,35	27,24	75,11	76,55
4	191,21	3,56	41,70	47,78	9,96	9,05	18,44	21,21	20,95	23,16	61,63	66,10
5	170	2,5	67,80	61,67	7,12	7,72	26,62	26,92	27,56	27,99	75,02	74,13
6	170	2,5	64,41	61,67	7,77	7,72	27,35	26,92	30,36	27,99	75,17	74,13
7	170	2,5	62,32	61,67	7,28	7,72	28,04	26,92	28,97	27,99	75,44	74,13
8	140	2,5	75,32	81,30	6,17	5,84	25,53	24,53	26,27	25,29	76,41	75,90
9	170	1	64,45	61,67	7,42	7,72	27,22	26,92	28,21	27,99	74,76	74,13
10	200	2,5	42,84	42,03	9,18	9,60	18,79	17,04	20,91	19,53	63,96	61,13
11	170	4	63,13	61,67	7,68	7,72	26,13	26,92	27,23	27,99	73,63	74,13
Test	-	-	76,08		5,92		25,62		26,30		76,99	
Trat	T	t	ΔE	$\Delta \hat{E}$								
	(°C)	(H)										
1	148,79	1,44	0,75	0,91								
2	191,21	1,44	31,89	28,94								

3	148,79	3,56	1,47	0,91
4	191,21	3,56	35,35	28,94
5	170	2,5	8,43	14,92
6	170	2,5	12,40	14,92
7	170	2,5	14,04	14,92
8	140	2,5	0,81	-4,89
9	170	1	11,84	14,92
10	200	2,5	34,10	34,74
11	170	4	13,08	14,92
Test	-	-	0,00	

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	61,6679	1,18812	51,9038	0
b1	-13,8839	1,39319	-9,96553	0

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO a* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	7,71994	0,144292	53,5022	0
b1	1,33098	0,169197	7,86642	0

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO b* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	26,9205	0,702691	38,3107	0
b1	-2,64826	0,591402	-4,47794	0,0021
b11	-3,06644	0,672775	-4,55789	0,0019

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	27,9936	0,620783	45,094	0

b1	-2,03822	0,522466	-3,90116	0,0045
b11	-2,79086	0,594354	-4,69562	0,0016

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO h^* DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	74,1348	0,877326	84,5009	0
b1	-5,22098	0,73838	-7,07086	0,0001
b11	-2,80953	0,839975	-3,34478	0,0102

COEFICIENTES GERADOS PARA O MODELO DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO ΔE DA MADEIRA *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

Parâmetro	Estimativa	Erro	Teste t	P-valor
b0	14,924	1,2123	12,3105	0
b1	14,0117	1,42155	9,85663	0

$$\widehat{L}^* = (61,6679) - (13,8839)T_1$$

$$\widehat{a}^* = (7,71994) + (1,3310)$$

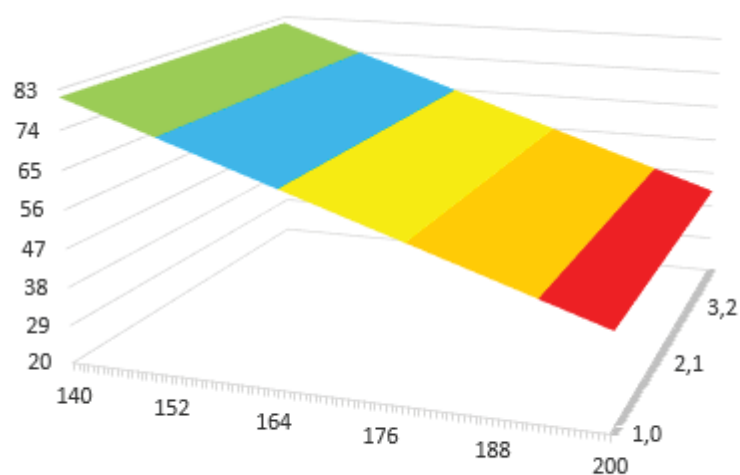
$$\widehat{b}^* = (26,9205) - (2,64826)T_1 - (3,06644)T_1^2$$

$$\widehat{C}^* = (27,9936) - (2,0382)T_1 - (2,79086)T_1^2$$

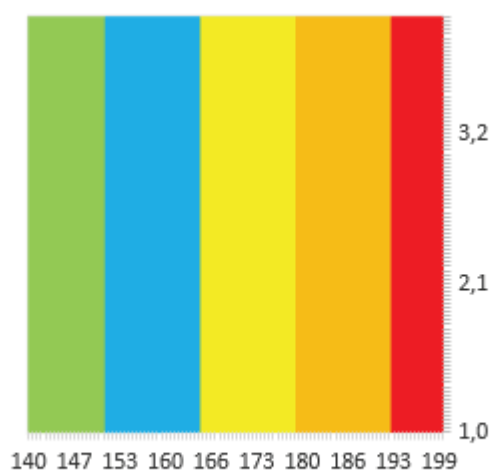
$$\widehat{h}^* = (74,1348) - (5,22098)T_1 - (2,80953)T_1^2$$

$$\widehat{\Delta E} = (14,924) + (14,0117)T_1$$

SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L^* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

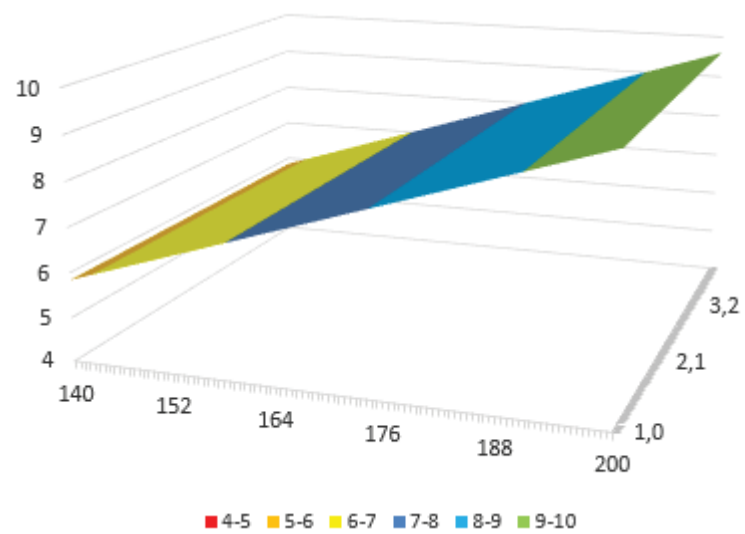


■ 38-47 ■ 47-56 ■ 56-65 ■ 65-74 ■ 74-83

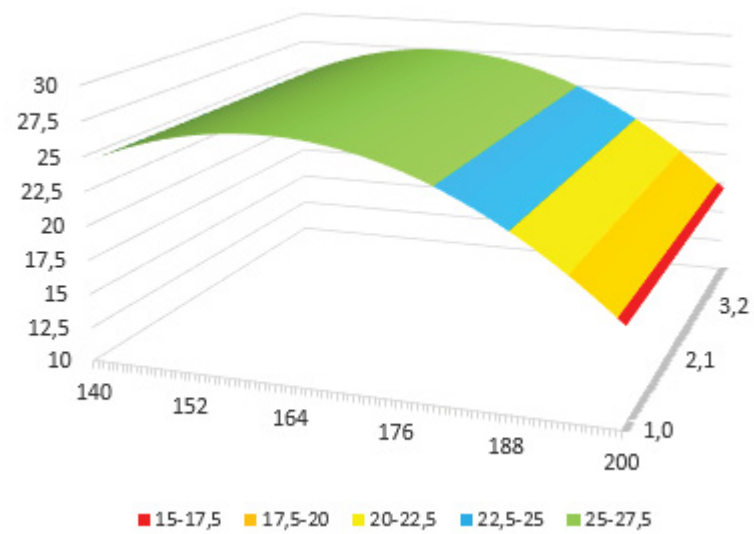


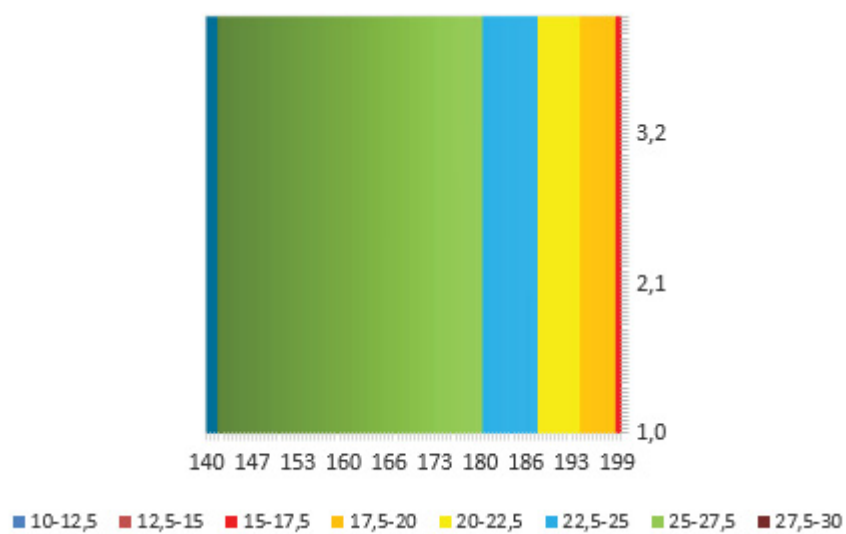
■ 38-47 ■ 47-56 ■ 56-65 ■ 65-74 ■ 74-83

SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO a^* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

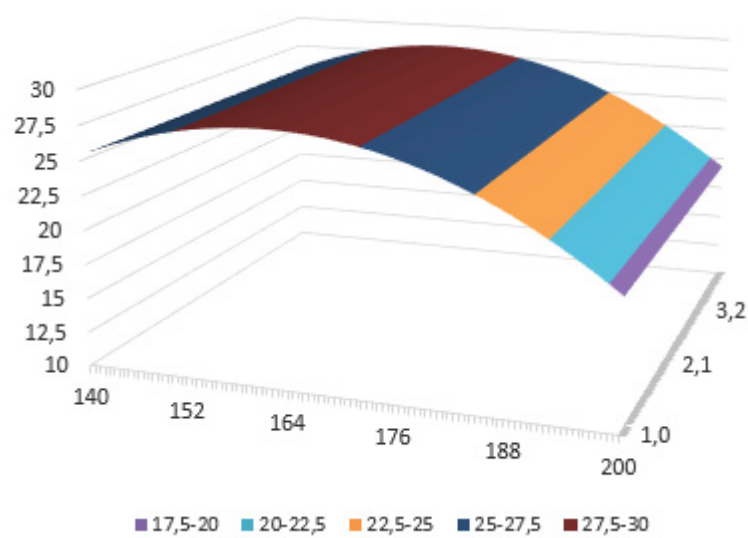


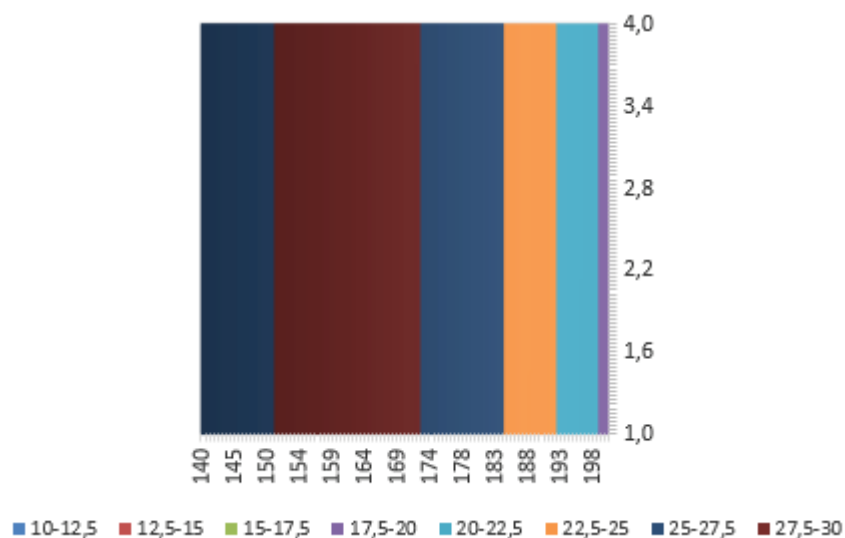
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO b^* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



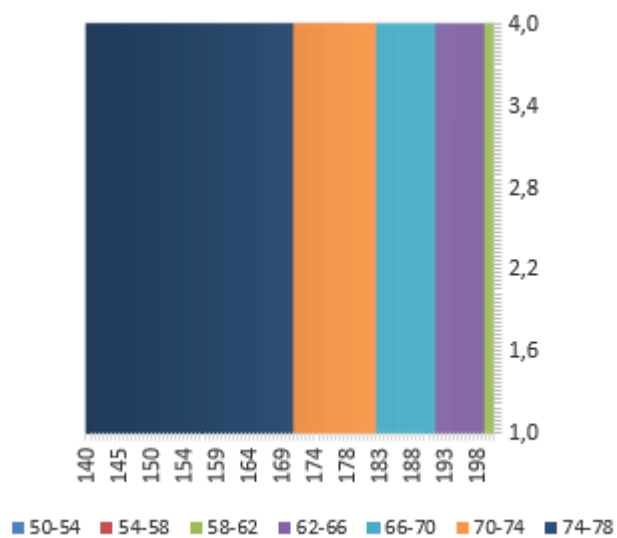
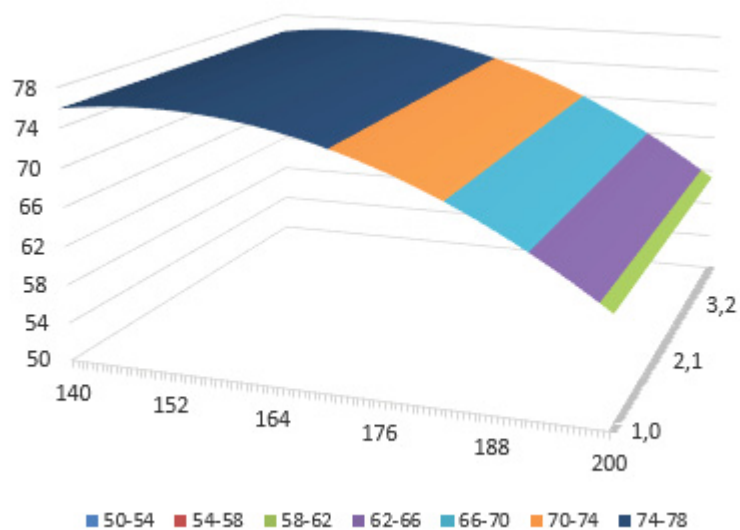


SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE





SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO h^* DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE



SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS DE NÍVEL GERADAS PARA O PARÂMETRO COLORIMÉTRICO ΔE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA TERMICAMENTE

