

Práticas de Engenharia em Laboratório de Reciclagem de Papel

Sânia da Costa Fernandes¹, José Waldo Martínez Espinosa²

Universidade Federal de Goiás – *Campus* Catalão, 75704-020, Brasil

sania.scf@gmail.com, jose@liec.ufscar.br

PALAVRAS-CHAVE: Eco-desenvolvimento, Planejamento Experimental, Reciclagem.

1. Introdução

A postura pró-ativa e de excelência ambiental, a consciência de limite dos recursos naturais disponíveis e a responsabilidade social, propõem encorajar mudanças de comportamento para a adoção de práticas de gestão sustentável visando o alcance de mecanismos para o eco-desenvolvimento, cuja preocupação não é apenas das organizações privadas, mas também das instituições públicas.

No âmbito da educação, questões sobre a sustentabilidade destacaram-se através da elaboração do documento intitulado “Década da Educação das Nações Unidas para um Desenvolvimento Sustentável, 2005-2014”, pela Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO, 2004).

Neste contexto, de forma a atrelar a formação acadêmica aos princípios do desenvolvimento sustentável, foi proposto o projeto intitulado “Montagem de laboratório interdisciplinar de reciclagem de papel”, que se insere nos resultados destacados pela UNESCO (2004): a compreensão da sustentabilidade pelos docentes e discentes; o enfoque interdisciplinar; e a garantia da ponte entre teoria e prática, função maior do ensino superior.

A reciclagem é uma estratégia para o gerenciamento de substâncias residuais, e está relacionada à Produção Mais Limpa (PML), pois busca reduzir recursos e reutilizá-los no mesmo processo, e oportuniza interações para alavancar o compromisso ambiental.

Observa-se que o papel é um excedente sólido orgânico com grande volume de produção, cujo desempenho em 2010 foi de 9.792.000 toneladas de papéis produzidas (BRACELPA, 2011). Em relação a esse mercado, segundo dados da Bracelpa (2009), a taxa de recuperação de papéis recicláveis no Brasil, em 2009, correspondeu a 46% do consumo aparente, com um total de 33,4% de aparas de papéis de imprimir/escrever recuperadas. Salienta-se que os dados finais referentes ao ano de 2010 ainda não foram disponibilizados pela Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa), mas acredita-se que a atuação do setor

Revisado pelo orientador.

1. Estudante de Engenharia de Produção – Universidade Federal de Goiás, *Campus* Catalão; Orientanda.

2. Professor do curso de Engenharia de Produção – Universidade Federal de Goiás, *Campus* Catalão; Orientador.

tenha se elevado mediante a promoção dessa nova categoria de material e a demanda por fechamentos de ciclos de consumo.

Especificamente na região Centro-Oeste, o estado de Goiás é o único a produzir papeis reciclados em escala industrial, com aproximadamente 62 mil toneladas de aparas reaproveitadas no ano de 2010 (BRACELPA, 2010). Embora esse valor seja considerável, é necessário alavancar este resultado, pois a reciclagem contribui de forma efetiva e sistêmica para o balanço ambiental positivo e garante vantagens econômicas (ILGIN *et al.*, 2010).

Contudo, deve-se considerar que no processamento da reciclagem de papel é importante realizar o controle das variáveis independentes que influenciam o processo, com o propósito de obter melhorias na produção, redução das variabilidades, tempos de desenvolvimentos e custos totais diminuídos. Neste aspecto, a metodologia de planejamento experimental é aplicável e foi considerada a mais adequada para o estudo.

O planejamento experimental (*experimental design - DOE*) representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, visando determinar, a partir da elaboração de conclusões quantitativas, os parâmetros-chave do desenvolvimento do produto que impactam o desempenho do sistema estudado (CALADO e MONTGOMERY, 2003).

De acordo com Button (2005), a técnica abordada permite a elaboração, estruturação e controle dos critérios de produção para diversos materiais por meio da combinação de fatores específicos ao processo, além de prover a sustentação de estudos de caracterizações dos produtos, demonstrando-se bastante útil para a obtenção de resultados com confiabilidade.

Por fim, ressalta-se que o processo de coleta seletiva estruturado no projeto visou somente à recuperação de papeis pós-consumo do tipo A4, com dimensões de 210 × 297 milímetros, conforme definido pelo padrão internacional ISO 216 (KUHN, 2006). Essa categoria de papel possui características desejáveis e propõe a facilidade de diagnóstico, avaliação e aplicabilidade.

A relevância da pesquisa baseia-se na formação crítica e interdisciplinar da sociedade acadêmica e civil em relação ao tema de desenvolvimento sustentável, e na construção holística do intercâmbio entre conhecimentos teóricos e ações práticas. Também, atua como uma proposta para replicação em outros *campus* da Universidade e em outras Instituições de Ensino Superior (IES), conforme a UNESCO (2004) defende.

2. Objetivos

Objetivo geral: implantar um laboratório para produção de papeis reciclados, para que os mesmos sejam reutilizados nos próprios centros fornecedores.

Objetivos específicos: apoiar a viabilização da coleta seletiva na Universidade; definir o processo de reciclagem de papel a partir da máquina recicladora; obter, a partir dos ensaios controlados, as caracterizações dos papéis produzidos e analisar, estatisticamente, a interação das variáveis de processamento.

3. Metodologia

Baseando-se em abordagem sistêmica e crítica, a pesquisa realizada é de natureza bibliográfica e exploratória, através de estudos sobre o setor de celulose e papel relacionado à reciclagem e às formas de produção, das técnicas para qualificar o material, e dos conceitos em engenharia. Refere-se, também, a trabalho acadêmico e em campo, na avaliação da coleta seletiva. Aplicaram-se métodos adequados de produção, bem como técnicas experimentais e estatísticas para caracterização dos papéis e análise dos resultados. Na fase de planejamento experimental, respeitaram-se as etapas definidas por Calado e Montgomery (2003).

3.1 Planejamento Experimental

A partir de um experimento inicial, denominado experimento exploratório ou de peneiramento (*screen experiment*), determinou-se as variáveis importantes no processo de reciclagem de papel. Experiências subsequentes foram realizadas para definir o nível do planejamento e selecionar os valores das variáveis críticas identificadas. O objetivo foi verificar como a variação dos fatores, um em relação aos outros, influenciam nos tipos de papéis reciclados obtidos e, conseqüentemente, nas características finais.

O planejamento experimental fatorial 2^k (k = número de variáveis independentes) foi realizado a partir do software criado pela *Statsoft*, o STATISTICA. Utilizou-se da sequência de ferramentas: *Statistics – Industrial Statistica & Six Sigma – Experimental Design (DOE)*. A ordem para realização dos tratamentos foi estipulada como aleatória (randômica).

Os fatores de controle definidos foram quantidade de água, quantidade de papel, e tempo de desagregação das aparas, com nível dois, ou seja, os fatores são investigados em valores fixo superior (+) e inferior (-). Os valores de referência para a realização dos experimentos foram: 80 litros de água e 2,4 quilos de papel, determinados a partir das condições que a máquina oferece para se ter o escoamento da polpa mediante a altura das válvulas em relação ao fundo dos equipamentos. A variação das quantidades, tanto de água quanto de papel, foi estabelecida em 4% para mais e para menos, a partir da tolerância de gramatura definida pela norma ABNT NBR 5339:2002/2008. Os tempos para desagregar as aparas foram definidos em 20 ou 30 minutos, conforme instruções do fabricante da máquina.

As variáveis de respostas avaliadas para análise de variância (ANOVA) e pela Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), através do STATISTICA, foram: gramatura, espessura, densidade aparente, resistência à tração, comprimento de auto ruptura, pH e notas.

A matriz de experimentos obtida a partir do software STATISTICA é apresentada na Tabela 1. O nível (+) para a quantidade de água significa que é utilizada maior quantidade de água a partir do valor de referência; o mesmo se aplica à quantidade de papel. De forma análoga, o símbolo (-) implica em menor quantidade de água/papel em relação ao valor de base. Para a variável tempo, (+) se refere a 30 minutos e (-) indica 20 minutos.

Tabela 1. Matriz de planejamento do experimento fatorial 2³.

Ordem dos testes			2 ³ experimentos							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Fatores Controle	Litros de água	(x ₁)	-	+	-	+	-	+	-	+
	Quilos de papel	(x ₂)	-	-	+	+	-	-	+	+
	Tempo	(x ₃)	-	-	-	-	+	+	+	+

3.2 Descrição do processo produtivo de reciclagem de papel

Para o projeto, um manual técnico detalhado foi elaborado para orientação aos alunos e futuros integrantes da equipe, e é disposto de forma sucinta no presente trabalho.

Inicialmente, os papeis destinados à reciclagem foram inspecionados e selecionados, baseando-se em aspectos de integridade das folhas, limpeza e umidade. Após a seleção, retiraram-se materiais restritivos para a formação do produto desejado e impróprios para o processo fabril, como cliques e grampos. Em seguida, os papeis foram pesados em uma balança analítica com precisão de 0,01 gramas (marca *Radwag Wagi Elektroniczne*/modelo WTB 3200) de acordo com a quantidade estabelecida a cada experimento.

A Figura 1 apresenta a ilustração da máquina recicladora com os nomes dos equipamentos que a compõe. Também, estão simbolizadas as ordens de ocorrência das operações, explicadas como se segue.

1. De acordo com cada experimento, a quantidade determinada de água é colocada no *Hidrapulper* (desagregador); acrescentam-se os papeis, e liga-se o motor para rotação da lâmina de serra circular, respeitando-se os tempos pré-determinados para a operação.
2. A polpa obtida é enviada para o tanque de depósito de massa.
3. Em sequência, a massa é encaminhada para o dosador, onde, a partir de uma escala, se define o controle da gramatura. A definição da escala é em função da capacidade do dosador, ou seja, para cada valor da escala mediu-se o volume, em litros, de polpa que é capaz de entrar no recipiente e qual é a respectiva gramatura adquirida pela folha de papel. Estas informações foram definidas a partir de avaliações, trabalhos realizados na máquina, e

mediante dados fornecidos pelo fabricante do equipamento. As relações estão contidas nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1. Gramatura – Escala de 23 a 12 cm.

Escala (cm)	Litros de polpa	Gramatura (m ² /g)
23	14,2	521
22	13,5	506
21	12,8	479
20	12,1	453
19	11,4	426
18	10,7	400
17	9,9	373
16	9,3	347
15	8,5	320
14	7,8	294
13	7,1	267
12	6,4	241

Tabela 2.2. Gramatura – Escala de 11 a 1 cm.

Escala (cm)	Litros de polpa	Gramatura (m ² /g)
11	5,7	214
10	5,0	187
9	4,3	161
8	3,6	135
7	2,9	108
6	2,2	80
5	1,5	55
4	8,2	30
3	3,7	13
2	0	0
1	0	0

4. A polpa contida no dosador segue para o tanque de mistura de água e massa. Neste reservatório mantém-se um nível de 5% abaixo da borda, cuja restrição é imposta pela máquina. Para isto, o tanque é preenchido com água, que se mistura com a massa água-papel.

5. Na caixa formadora, cujo fundo é constituído por uma mesa plana, acopla-se uma tela com tamanho de 1,00 × 0,70 metros. Após isso, é necessário que a água presente na niveladora seja enviada àquela caixa, cujo nivelamento é instantâneo. Ainda com o registro da niveladora aberto, a caixa formadora é alimentada pela polpa homogeneizada; desta forma, o nível de água que excede a altura do ladrão na niveladora escoo para o tanque de água recuperada, que é reaproveitada através do envio para o desagregador. A água em excesso contida na suspensão na caixa formadora é drenada e segue para o tanque de mistura de água e massa.

Para a secagem do papel, a tela retirada da máquina é disposta em uma superfície plana horizontal, e sobre ela é colocada outra tela, que são compactadas manualmente.

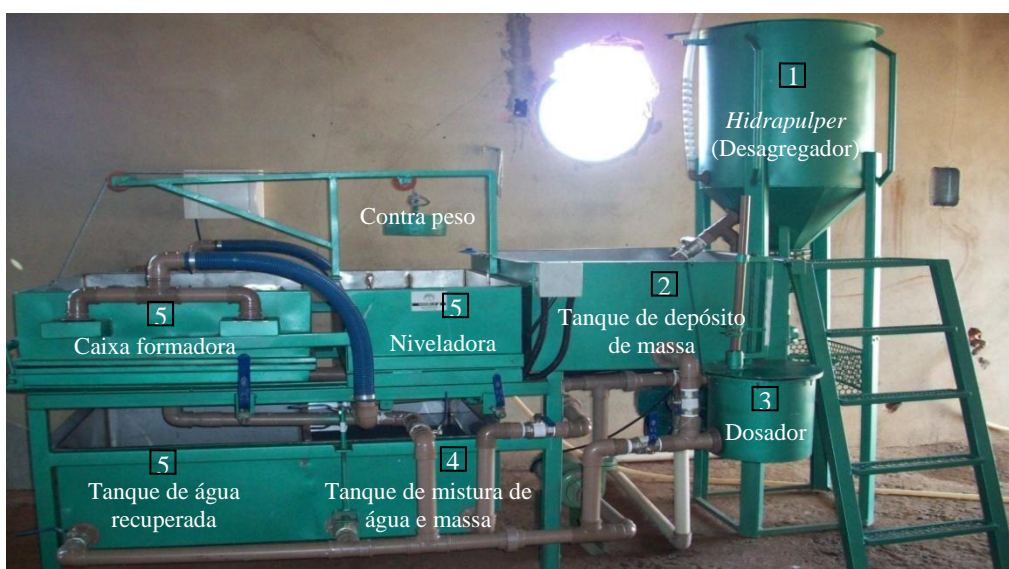


Figura 1. Máquina recicladora de papel na UFG/CAC: equipamentos e seqüência de operações.

3.3 Caracterização dos papeis e avaliação qualitativa: métodos e aspectos teóricos

Os papeis produzidos foram cortados em tamanho de 210 × 297 milímetros (A4), utilizando-se de um escalímetro na escala 1:100 (marca *Trident*). As folhas foram submetidas a testes de natureza física, mecânica, de caráter químico, além da avaliação qualitativa.

A gramatura é o quociente entre a massa e a área da amostra, expressa em gramas por metro quadrado (g/m^2) (KLOCK, 2000). Utilizou-se uma balança analítica com precisão de 0,01 gramas (marca *Radwag Wagi Eletroniczne*/modelo WTB 3200) para a definição dos pesos dos papeis. Então, converteu-se o valor obtido para a proporção de um metro quadrado.

A espessura corresponde à distância perpendicular entre as duas faces da folha de papel. Para a leitura, os corpos de prova foram sujeitos a uma pressão constante de dois discos planos e paralelos de um micrômetro digital com precisão de 0,001 milímetros (marca *Pantec*). Ressalta-se que para cada amostra, mediu-se a espessura em cinco pontos diferentes, cuja média e desvio-padrão dos valores foram calculados através do programa Excel[®].

Por incluir os espaços do papel preenchidos com ar, a densidade aparente (ρ_a) é uma importante propriedade. Refere-se à massa, em gramas, por centímetro cúbico (g/cm^3) (FERREIRA, 2008), e foi calculada pela equação (1).

$$\rho_a = \text{gramatura (g/cm}^2) \div \text{espessura (cm)} \quad (1)$$

A maneira do papel em resistir à ação de forças externas é avaliada pela resistência à tração, que é a tensão necessária para causar a ruptura do corpo de prova (FERREIRA, 2008).

Nos ensaios efetuados, tiras de papeis transversais e longitudinais de cinco milímetros de largura foram submetidas à força de tração em ambas as extremidades. Para isso, foi montado um aparato experimental em que os extremos das amostras foram presos a pequenas estruturas metálicas (clipes), na qual um foi colocado diretamente em contato com o sensor de força e, o outro limite foi preso a uma pequena corda que se movia através de uma roldana na proporção que era aplicado um movimento de rotação através de uma manivela. À medida que a corda se enrolava na roldana, a tira de papel era alongada até causar a ruptura.

Para a captura da força aplicada, utilizou-se um dinamômetro eletrônico (marca *Cidepe*), em conjunto com o software específico, denominado *CidepeLab V1*. A ferramenta gráfica de força em função do tempo, e a grade de aquisição de dados foram empregadas. A tensão de tração (T), em Newton por milímetro quadrado (N/mm^2), foi obtida a partir da equação (2), no qual F é a força de ruptura, e A é a área da amostra (largura × espessura).

$$T = F (\text{N}) \div A (\text{mm}^2) \quad (2)$$

A resistência à tração também pode ser expressa pelo comprimento de auto ruptura (CAR), em metros (m), definido como o comprimento necessário para a tira de papel se

romper pelo próprio peso quando suspensa por uma das extremidades (KLOCK, 2000). É calculado pela equação (3), na qual F é a carga de ruptura, G é a gramatura, e L a largura.

$$CAR = [F \text{ (kgf)} \times 1000000] \div [G \text{ (g/m}^2\text{)} \times L \text{ (mm)}] \quad (3)$$

Na análise de pH, para definir a característica ácida ou básica dos papeis, as folhas foram picotadas e colocadas em água destilada, e utilizou-se um pHmetro (marca *Lameter*).

Também, com o objetivo de conhecer a percepção das pessoas quanto aos papeis produzidos, aplicou-se um questionário para cinco alunos, com questões referentes à lisura, gramatura, incidência de pontos e aplicabilidade dos papeis, no qual atribuíram notas para cada atributo, de acordo com a Escala Likert (Tabela 3). Os envolvidos não foram informados quanto ao tipo de ensaio de cada papel, visando à obtenção de resultados não tendenciosos.

Tabela 3. Escala Likert.

Nota	7	6	5	4	3	2	1
Percepção	Excelente	Muito bom	Bom	Satisfatório	Pouco satisfatório	Baixo	Medíocre

4. Resultados e Discussões

4.1 Avaliação do processo de Coleta Seletiva

O processo de Coleta Seletiva é fundamental para o êxito do projeto, e é coordenado por professores dos departamentos de Engenharia de Produção e de Engenharia de Minas.

Há o envolvimento incessante dos departamentos da UFG - *Campus* Catalão pela separação e fornecimento de papeis para a reciclagem. Entretanto, ainda não foram estruturados coletores próprios (de código azul) para serem dispostos em cada setor, o que contribuiria para a organização e coleta. Esse aspecto surge como uma proposta de melhoria.

De qualquer modo, o processo de coleta seletiva está sendo promovido por integrantes do projeto mediante a divulgação em reuniões e a cada departamento, no qual se prioriza a coleta de papeis tipo A4, devido ao próprio caráter do projeto.

Para a viabilidade da coleta, realizaram-se reuniões, coordenadas pela própria bolsista, com a equipe de limpeza e juntamente com o prefeito do *campus*, em que se firmou o compromisso da equipe de limpeza em contribuir para a realização da coleta e transporte dos papeis até o local onde a máquina está instalada. Também, alunos auxiliam nesta operação.

4.2 Análise dos equipamentos e do processamento de papel

A máquina recicladora possui capacidade de processamento próxima de cinco quilogramas de papel por batelada, e pode ser dividida, basicamente, em três compartimentos: o reservatório superior, bem como o inferior, além de um sistema de bombeamento.

Constituído por tubulações, válvulas e canos, aquele último sistema permite a circulação da água e da polpa de papel. Há, também, uma bomba com capacidade de bombeamento de 4 metros de altura e 25 m³/h. Admite-se que esse sistema é composto por saídas para os dois reservatórios e outra de limpeza, para que se possa esvaziar a máquina.

A máquina pode operar com aproximadamente 400 litros de água no sistema, mas possibilita a reciclagem desse insumo continuamente no processo. Desta forma, uma das funções do reservatório inferior é permitir o armazenamento e o reaproveitamento da água utilizada. É necessário repor apenas o volume de água que sai com a umidade da folha, que corresponde à quantidade de papel produzido. Também, possui um tanque onde ocorre a mistura entre água e polpa enviada do dosador.

A fabricação de papel reciclado se processa efetivamente no reservatório superior, que permite acoplar outros dispositivos importantes para o processo. Pode-se classificá-lo como a parte úmida da máquina, uma vez que grande quantidade de água está envolvida nas etapas.

Através de experimentos preliminares de processamento de papel e análise das condições de operação, determinou-se que a consistência de polpa ideal que pode ser utilizada é entre 2% e 4%, para garantir a circulação adequada nas tubulações e canos. Valores abaixo de 2% acarretam na formação de papeis muito finos. Valores superiores a 4% podem ocasionar a obstrução dos caminhos de passagem da massa. A consistência utilizada foi igual a 3%, considerada adequada para a circulação da massa na máquina e obtenção de papeis.

A estimativa de produção da máquina recicladora é de 240 folhas de papel A4/hora. O processamento de papel engloba operações simples, mas que devem ser efetuadas com cautela, pois os processos de abertura e fechamento de válvulas são feitos manualmente. Assim, as variabilidades que podem estar associadas à produção devem ser minimizadas como pela cronometragem dos tempos e execução das operações por apenas uma pessoa.

O esquema da Figura 2 representa as etapas para reciclagem de papeis a partir da máquina até obtenção do produto “papel reciclado”, conforme já explicado no tópico 3.2.

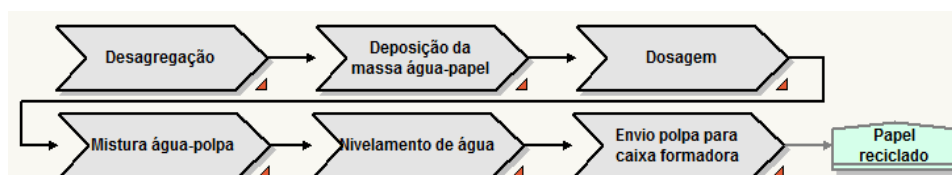


Figura 2. Etapas no processamento de papel reciclado na máquina recicladora.

Basicamente, como principal unidade do sistema de processamento de papeis recuperados tem-se o desagregador, que possui capacidade de 200 litros de água, e que converte os papeis em polpa bombeável através do umedecimento, corte e fragmentação das

fibras das aparas. A quantidade de massa enviada para o dosador está de acordo com os valores da escala e o parâmetro para a realização dos experimentos foi o valor seis.

Quando a quantidade de massa dosada é enviada para o tanque de mistura de água e massa, tem-se a diminuição da consistência da polpa para um valor de $\pm 0,5\%$, e ocorre a hidratação das fibras, que garante o índice de enfiamento e área disponível para a formação de ligações químicas (pontes de hidrogênio), embora seja menor em relação à fibra virgem. A função do nivelamento de água com a caixa formadora é garantir que a massa não seja assentada de forma irregular sobre a tela, propiciando a formação de folhas planas e lisas. Por fim, depois de retirado da máquina, para que as especificações de umidade sejam ideais, entre uma tela e outra, o papel passa para a fase de secagem natural na sombra.

Entretanto, deve-se mencionar que de acordo com as características da máquina, esta é propícia para um sistema de produção contínua, e não intermitente, para que os tempos de *setup* (preparação e limpeza) sejam reduzidos e não-dispendiosos.

A Figura 3 mostra produtos que foram obtidos no laboratório de reciclagem de papel.



Figura 3. Produtos: papel entre as telas; papéis A4 reciclados; sacola, envelope e caixa.

4.3 Caracterizações dos papeis e análise dos resultados

Após a finalização dos E_i ($i = 1..8$) experimentos (Tabela 1), as caracterizações físico-mecânicas foram efetuadas. Ressalta-se que os testes também foram realizados para uma amostra controle (AC), os papeis reciclados produzidos pela empresa *International Paper*.

Para todos os ensaios, na análise de variância (ANOVA) realizada com a estatística F, considerou-se que a hipótese nula é de que não há diferença significativa entre os valores analisados de uma população. O nível de significância (α) utilizado foi de 5%.

Os resultados referentes à gramatura são apresentados na Figura 4 e Tabela 4.

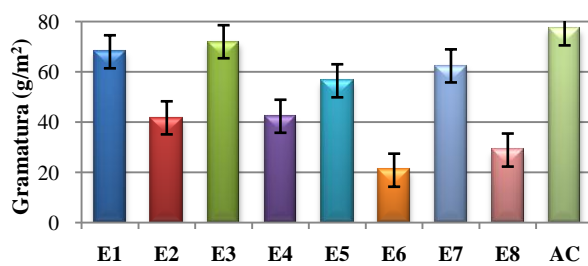


Figura 4. Gráfico de valores de Gramatura.

Tabela 4. Resultado ANOVA – Gramatura.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x ₁	1955,313	1	1955,313	522,7953	0,027825
x ₂	43,199	1	43,199	11,5501	0,182180
x ₃	384,615	1	384,615	102,8352	0,062576
x ₁₂	0,208	1	0,208	0,0556	0,852559
x ₁₃	21,615	1	21,615	5,7793	0,250954
x ₂₃	10,835	1	10,835	2,8968	0,338177
Erro (ϵ)	3,740	1	3,740		

Observa-se que mesmo o valor da escala do dosador sendo fixo, os papeis desenvolvidos apresentam gramatura variando de 20,84 a 71,99 g/m², proporcionalmente ao peso de cada amostra. A gramatura dos papeis de E3 é a maior e mais próxima da amostra controle (77,12 g/m²). Os papeis de E6 e E8 obtiveram as menores gramaturas (20,84 e 28,86 g/m²) e, E2 e E4 forneceram papeis com gramaturas quase iguais (41,69 e 42,32 g/m²).

A análise de variância demonstra com 95% de confiança que o fator “Litros de água” (x₁) influencia na gramatura, pois o valor-p é menor que o nível de significância (α). Disto, infere-se que a hipótese nula restrita a esse fator é rejeitada. Ao mesmo tempo, verifica-se que o fator “Tempo” (x₃) tem um efeito significativo médio. Para a variável “Quilos de papel” (x₂) bem como para as interações entre os fatores (x₁₂, x₁₃ e x₂₃) é possível concluir, com a estatística F, que existe a probabilidade (valor-p distante de α) de desprezar os efeitos principais desses parâmetros como sendo significativos para a resposta gramatura.

Os experimentos realizados com maior quantidade de água (E2, E4, E6 e E8) fornecem papeis com gramatura inferior aos demais (E1, E3, E5 e E7). Também, quando se aumenta o tempo para desagregação das aparas, a gramatura dos papeis tende a diminuir. Isto é comprovado pela Superfície de Resposta (SR), no Gráfico 1.

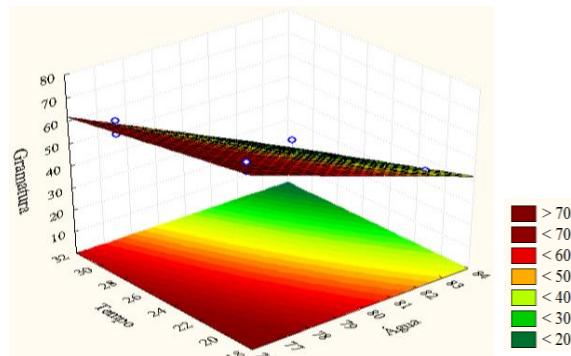


Gráfico 1. Superfície de Resposta Tridimensional Plana para Gramatura.

Na Figura 5 são ilustrados graficamente os dados obtidos para a resposta espessura. Os valores variam entre 0,064 a 0,166 mm, e o maior desvio padrão é de $3,21 \times 10^{-3}$ mm (em E8), provando que os papeis apresentam adequada uniformidade. Percebe-se que a espessura está relacionada à gramatura, embora esta afirmação não se aplique à amostra controle.

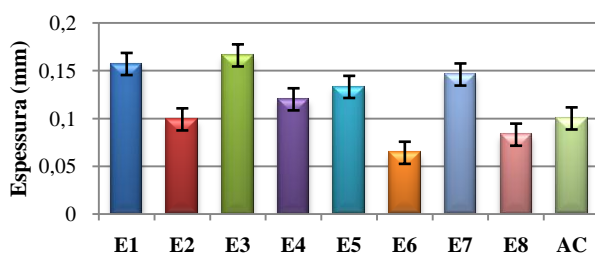


Figura 5. Gráfico de valores de Espessura.

Tabela 5. Resultado ANOVA – Espessura.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x ₁	0,006962	1	0,006962	1547,111	0,016182
x ₂	0,000481	1	0,000481	106,778	0,061417
x ₃	0,001682	1	0,001682	373,778	0,032899
x ₁₂	0,000040	1	0,000040	9,000	0,204833
x ₁₃	0,000098	1	0,000098	21,778	0,134386
x ₂₃	0,000001	1	0,000001	0,111	0,795167
Erro (ε)	0,000004	1	0,000004		

O quadro de ANOVA (Tabela 5) demonstra que os fatores x_1 e x_3 são os que realmente produzem efeitos significativos sobre a espessura. Também, x_2 pode provocar algum efeito médio na resposta (valor- $p \approx \alpha$). Já as interações entre os fatores não causam efeitos relevantes sobre os valores de espessura e , então, a hipótese nula é aceita.

Analisando-se a Superfície de Resposta (SR), no Gráfico 2, admite-se com segurança que quanto menor os valores de x_1 e x_3 , maior é a espessura. O inverso também se aplica.

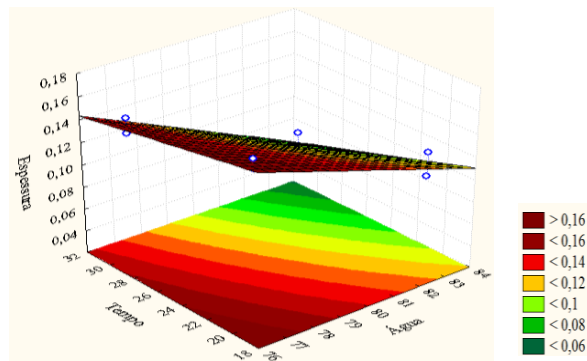


Gráfico 2. Superfície de Resposta Tridimensional Plana para Espessura.

Em relação à densidade aparente (ρ_a), os resultados oscilaram entre 0,326 e 0,434 g/cm^3 , como é visto na Figura 6. Para todos os experimentos, nota-se a relação de proporcionalidade entre gramatura e espessura, e por isso a diferença entre os valores de ρ_a é pequena. Entretanto como essa analogia não pode ser realizada para a amostra controle, nesta a massa média por volume é maior, significando que são poucos os espaços preenchidos com ar. A variação desta propriedade para os papeis produzidos pode ser atribuída ao método de produção, que é diferente do industrial, e não se realizaram tratamentos mecânicos nos papeis.

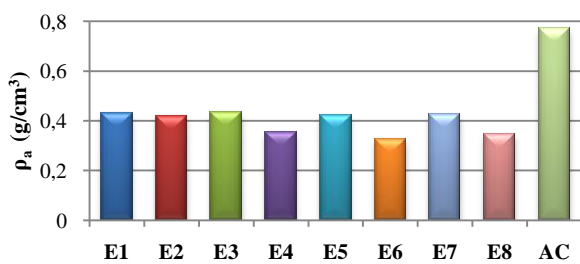


Figura 6. Gráfico de valores de Densidade Aparente.

Tabela 6. Resultado ANOVA – Densidade Aparente.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x_1	0,009112	1	0,009112	9,413740	0,200579
x_2	0,000220	1	0,000220	0,227789	0,716513
x_3	0,001682	1	0,001682	1,737603	0,413163
x_{12}	0,000313	1	0,000313	0,322831	0,671062
x_{13}	0,000882	1	0,000882	0,911157	0,514802
x_{23}	0,001058	1	0,001058	1,092975	0,485855
Erro (ϵ)	0,000968	1	0,000968		

Os resultados de ANOVA, na Tabela 6, para a resposta densidade aparente demonstram que os efeitos principais provocados pelos fatores de controle e das interações entre eles, são desprezíveis. Ou seja, com o teste da estatística F não é possível concluir com segurança sobre a influência dessas variáveis independentes na variável dependente.

A Figura 7 ilustra os dados registrados para a resposta resistência à tração, tanto longitudinal quanto transversal. Essa, é também expressa, na Figura 8, pelo comprimento de

auto ruptura (CAR). Os quadros da ANOVA para tensão de tração, em ambas as direções, são apresentados pelas Tabelas 7.1 e 7.2. Para o CAR, os resultados estão nas Tabelas 8.1 e 8.2.

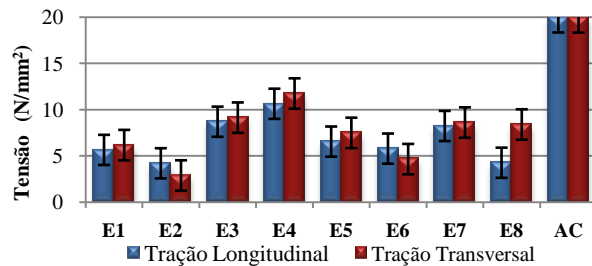


Figura 7. Gráfico de valores de Resistência à Tração.

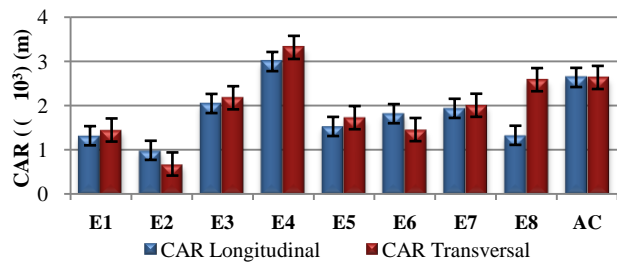


Figura 8. Gráfico de valores de CAR.

Tabela 7.1. Resultado ANOVA – Tensão: Longitudinal.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x ₁	2,25781	1	2,25781	0,413404	0,636227
x ₂	11,64031	1	11,64031	2,131335	0,382335
x ₃	2,36531	1	2,36531	0,433087	0,629459
x ₁₂	0,00361	1	0,00361	0,000661	0,983631
x ₁₃	3,41911	1	3,41911	0,626038	0,573867
x ₂₃	10,88111	1	10,88111	1,992326	0,392404
Erro (ε)	5,46151	1	5,46151		

Tabela 7.2. Resultado ANOVA – Tensão: Transversal.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x ₁	1,73911	1	1,73911	1,30113	0,458225
x ₂	34,90301	1	34,90301	26,11304	0,123026
x ₃	0,07801	1	0,07801	0,05837	0,849091
x ₁₂	9,09511	1	9,09511	6,80460	0,233050
x ₁₃	0,70211	1	0,70211	0,52529	0,600739
x ₂₃	6,07261	1	6,07261	4,54329	0,279264
Erro (ε)	1,33661	1	1,33661		

Tabela 8.1. Resultado ANOVA – CAR: Longitudinal.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x ₁	11487	1	11487,3	0,019190	0,912369
x ₂	889346	1	889345,8	1,485656	0,437405
x ₃	67728	1	67728,2	0,113140	0,793433
x ₁₂	17803	1	17803,1	0,029740	0,891282
x ₁₃	112160	1	112159,8	0,187364	0,739938
x ₂₃	996231	1	996231,1	1,664209	0,419797
Erro (ε)	598622	1	598621,5		

Tabela 8.2. Resultado ANOVA – CAR: Transversal.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x ₁	56386	1	56386	0,40942	0,637627
x ₂	2845365	1	2845365	20,66041	0,137863
x ₃	3540	1	3540	0,02571	0,898792
x ₁₂	942928	1	942928	6,84667	0,232395
x ₁₃	801	1	801	0,00581	0,951555
x ₂₃	477778	1	477778	3,46918	0,313678
Erro (ε)	137721	1	137721		

Examinados os dados, constata-se que o comportamento verificado para o comprimento de auto ruptura (CAR) está em consonância com os de resistência à tração. Mas, o desempenho observado para a amostra controle é superior aos demais papeis. Isto pode ser justificado por não terem sido realizados tratamentos visando à melhoria das propriedades mecânicas, e nem ter utilizado aditivos químicos. Deve-se lembrar que o papel produzido pode ser considerado um material compósito, constituído por fibras, ar e impurezas de tintas, o que pode afetar os resultados. Ademais, o fato de a força ter sido aplicada às amostras de papeis de forma manual, pela manivela, pode restringir os resultados e a precisão do ensaio.

Em todos os casos, seja de resistência à tração e CAR, o teste F, da análise ANOVA, aponta que a hipótese dos fatores x₁, x₂ e x₃, e a interação entre eles, de que não influenciam as respostas dos experimentos é verdadeira, em um nível de significância de 5%.

Pela análise de pH, na Figura 9, constata-se que os papeis são quimicamente básicos, pois os valores de pH são maiores que sete, entre 8,64 e 9,25. O resultado é bastante favorável, pois a acidez do papel produz o amarelamento, auto degradação, e corte da fibra de

celulose, causando a deterioração do produto. E pela Tabela 9, com 95% de confiança, tem-se que os fatores de controle e a interação entre eles não interferem nos valores de pH.

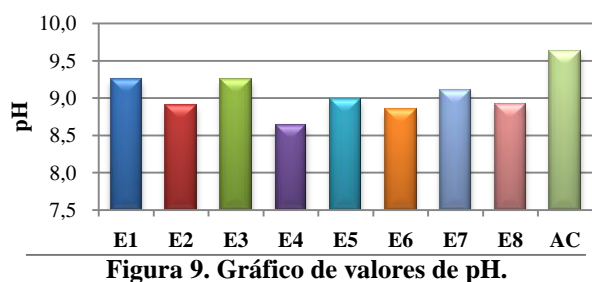


Tabela 9. Resultado ANOVA – pH.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x ₁	0,208013	1	0,208013	37,73469	0,102735
x ₂	0,001013	1	0,001013	0,18367	0,742238
x ₃	0,004513	1	0,004513	0,81859	0,531804
x ₁₂	0,012012	1	0,012012	2,17914	0,379050
x ₁₃	0,049612	1	0,049612	9,00000	0,204833
x ₂₃	0,023112	1	0,023112	4,19274	0,289218
Erro (ε)	0,005512	1	0,005512		

Por fim, na aplicação qualitativa, calculou-se a média das médias das notas de cada atributo avaliado, que são representadas pela Figura 10. Os valores variam entre 3,35 e 5,15. De modo geral, os papéis que receberam as maiores notas são aqueles provenientes dos experimentos em que o tempo para desagregação das aparas foi maior (E5, E7 e E8), embora para E6 essa constatação não é indicada, o que pode ser atribuído pelo fato do papel ser muito fino (parecido com papel seda). Mas, ressalta-se que os avaliadores julgaram positivamente a aplicabilidade. Acredita-se que as notas não foram mais satisfatórias pelo fato dos papéis não terem sido tratados mecanicamente por prensagem, calandragem e em uma refiladora.

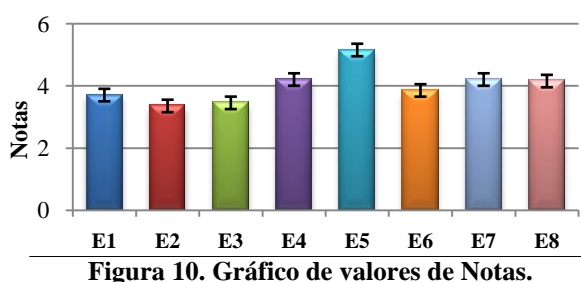


Tabela 10. Resultado ANOVA – Notas.

Fatores	SQ	g.l.	QM	F ₀	Valor-p
x ₁	0,112813	1	0,112813	40,1111	0,099696
x ₂	0,000313	1	0,000313	0,1111	0,795167
x ₃	0,877813	1	0,877813	312,1111	0,035997
x ₁₂	0,690313	1	0,690313	245,4444	0,040580
x ₁₃	0,382812	1	0,382812	136,1111	0,054434
x ₂₃	0,195312	1	0,195312	69,4444	0,076031
Erro (ε)	0,002813	1	0,002813		

A análise de variância, na Tabela 10, demonstra que o fator x₃ e a interação x₁₂ são os parâmetros mais significativos para a resposta notas. Neste último caso, significa que quando altera isoladamente o fator x₁ ou x₂ não se causa efeitos relevantes, mas quando são variados de forma conjunta provocam diferenças significativas entre os valores. Os demais fatores não causam influência. Pelas Superfícies de Resposta (SR) (Gráficos 3a e 3b), sabe-se que quando há o aumento do tempo de desagregação das aparas, a nota atribuída tende a ser maior.

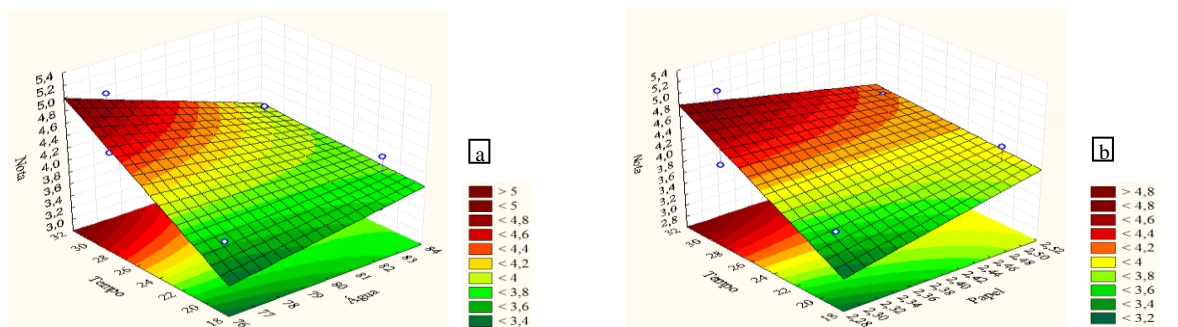


Gráfico 3a e Gráfico 3b. Superfície de Resposta Tridimensional Plana para Notas.

4.4 Efeitos teóricos dos aditivos químicos

Para melhorar a formulação de revestimento serão utilizados aditivos químicos. Em termos de interação pigmento-ligante, utilizar-se-á uma cola, cujas interações com as fibras são complexas, mas proporcionam alta consistência da folha, aumentam a aderência do papel e resistência da tração, cuja adesão das partículas é influenciada pela temperatura de secagem.

Outro componente a ser utilizado é o *carboximetilcelulose (CMC)*, um polímero extraído da celulose que influencia a viscosidade, o brilho impresso e a proteção do papel contra fungos (FARDIM, 2006). Segundo Fardim (2006), a parcela de água retida é transferida para a superfície do papel durante a aplicação, contribuindo para a adesão entre o papel e a camada de revestimento. Ainda, garante resistência a óleo e gordura (ROHR, 2007).

De acordo com Conceição *et al.* (2009), ligantes à base de *CMC* adicionados a formulações de revestimento de papel desempenham diferentes funções em termos de reologia das tintas de revestimento e nas propriedades do papel, mas depende da quantidade adicionada e da concentração do pigmento em relação ao comprimento da cadeia polimérica.

Desta forma, sabe-se que a cola e o *CMC* podem conferir à estrutura propriedades físico-mecânicas específicas, e serão utilizados para a melhoria do processamento de papel.

4.5 Promoção do projeto e publicação de resultados

Os trabalhos publicados, que confirmam o interesse da comunidade acadêmico-científica no projeto, foram: “Análise da viabilidade econômica da implantação de um laboratório de reciclagem de papel em uma universidade”, no ENCOBEP, 2011; “Diagnóstico da cadeia de suprimentos no contexto da Produção Mais Limpa: o estudo de caso do papel reciclado”, no ENEGEP, 2010; e “Integração para desenvolvimento de projetos sustentáveis”, no CICT, 2010. Além disso, a promoção do projeto ocorreu por meio do ‘CAC Notícias: boletim informativo do *Campus Catalão*’, de ano 01 e edição 32, com a notícia “CAC lança laboratório de reciclagem de papel”, e mediante entrevistas e filmagens pela TV Pirapitinga.

5 Considerações Finais

Dos estudos e atividades realizadas, conclui-se a importância de se conhecer o processo e a relação entre as variáveis de processamento para a produção efetiva dos papeis reciclados. Observa-se que embora tenha se aplicado um valor fixo na escala do dosador, a gramatura dos papeis depende da quantidade água-papel, e o experimento que conferiu papeis com maior aceitação pelos avaliadores foi o E5. Mas, algumas propriedades dos papeis obtidos podem ser melhoradas pela utilização de aditivos químicos, que são ambientalmente

inertes. Assim, provendo a ponte entre teoria e prática ao se trabalhar da coleta seletiva à produção dos papéis reciclados, o projeto apresenta importância técnica, social e econômica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Me. André Resende, pela valiosa contribuição para delineamento da pesquisa experimental; aos técnicos de laboratório Anivaldo, Gilmar e Márcia, pelo suporte técnico disponibilizado na realização das caracterizações dos papéis.

Referências

BRACELPA. *Celulose, Papel e Produtos Florestais*. São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2010.

BRACELPA. *Dados do Setor*. São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2011.

BRACELPA. *Relatório Estatístico Anual*. São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2009.

BUTTON, S. T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. p. 1-88. *Tese de Pós-Graduação*. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2005.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. *Planejamento de Experimentos usando Statistica*. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais. 260 p., 2003.

CONCEIÇÃO, S. *et al.* Relationship between coated paper properties and rheology of the coating color. *O Papel*. V. 70, n.11, p. 54-65, 2009.

FARDIM, P. Papel e Química de Superfície: Parte II – Revestimento e Printabilidade. *O Papel*. p. 75–83, maio, 2002.

FERREIRA, P. Propriedades do Papel. Ciência e Tecnologia da Pasta e do Papel. *Documento Eletrônico*. 2008.

KLOCK, U. Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore. 324 p. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.

KUHN, M. International Standard Paper Sizes. *Documento Eletrônico*. 2006.

ILGIN, M. A.; GUPTA, S. M. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, v 91, p. 563-591, 2010.

ROHR, T. G. Estudo reológico da mistura carboximetilcelulose/amido e sua utilização como veículo de inoculação bacteriano. *Tese de Mestrado*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica/Rio de Janeiro, 2007.

UNESCO. United Nations Decade of Education for Sustainable Development, 2005-2014. *Draft International Implementation Scheme*. New York, 2004.