

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO GRANULADO E BIO-ÓLEO A PARTIR DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

G.C. GONÇALVES¹, P.K. NAKAMURA¹, M.T. VEIT², K.G. FIAMETTI¹, G.M.C. SILVA¹

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo

² Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: cunha@utfpr.edu.br

RESUMO - O objetivo deste trabalho foi estudar a produção e caracterização do carvão ativado granulado (CAG) e bio-óleo a partir dos resíduos da indústria cervejeira: bagaço de malte seco (BMS) e creme de levedura centrifugado (CLC). O BMS foi misturado com CLC na proporção 1:1, peletizado e submetido à pirólise em leito fixo com vazão de 150 mL.min⁻¹ de N₂ e taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹ até atingir 850°C, permanecendo por 1 hora. Os carvões pirolisados foram ativados à 850°C, com fluxo de 150 mL.min⁻¹ de CO₂ em diferentes tempos de ativação. O bio-óleo obtido na etapa de pirólise apresentou poder calorífico de 31,2 kJ.g⁻¹, semelhante aos bio-óleos provenientes de outras biomassas. Foi possível obter um CAG com área superficial específica de 617,4 m².g⁻¹, volume total de poro de 0,232 cm³.g⁻¹ e índice de iodo de 490,1 mg.g⁻¹. A partir dos resultados obtidos pode-se verificar que o BMS e o CLC apresentaram-se como matérias-primas de grande potencial para a produção de CAG e bio-óleo.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com as estatísticas da companhia japonesa Kirin Holdings, o Brasil produziu um volume de 13,4 bilhões de litros em 2012, um aumento de 1,5% em relação ao ano anterior, permanecendo como o terceiro maior produtor de cerveja no mundo por três anos consecutivos (KIRIN HOLDINGS, 2014).

O bagaço de malte é o principal subproduto da indústria cervejeira, representando cerca de 85% dos subprodutos totais gerados (Reinold, 1997). Este subproduto encontra-se disponível em grande quantidade o ano todo, com baixo ou sem custo, e é gerado não apenas pelas grandes indústrias, mas também pelas pequenas (Mussato *et al.*, 2006). Segundo Townsley (1979), o bagaço de malte representa, em média, cerca de 31% do peso do malte original e aproximadamente 20 kg a cada 100 litros de cerveja produzida. De acordo com Ferreira *et al.* (2010), a levedura é o segundo principal subproduto da indústria cervejeira, no entanto tem recebido pouca atenção como um bem comercializável e sua disposição é frequentemente um problema ambiental, no entanto, pode ser utilizado como uma matéria-prima para diferentes aplicações.

A disposição final dos resíduos das atividades agroindustriais é geralmente um problema ambiental (Amaya *et al.*, 2007). Estes resíduos possuem baixo ou nenhum valor econômico e geralmente apresentam problemas de descarte. A conversão desses resíduos para

produtos mais nobres agregaria valor econômico, ajudaria a reduzir o custo de descarte dos resíduos (Rafatullah *et al.*, 2010).

Rodríguez-Reinoso (2006) define *carvão ativado* (CA) como um adsorvente industrial muito importante, pois exibe porosidade bem desenvolvida (micro, meso e macroporos), aliado à estabilidade térmica e química. O carvão ativado pode ser preparado por meio de dois tipos de processos industriais: ativação física ou a ativação química (Marsh e Rodríguez-Reinoso, 2006). A ativação física compreende duas etapas: a carbonização e a ativação. O processo de carbonização inclui secagem e aquecimento para remover sub-produtos indesejáveis como alcatrão e outros hidrocarbonetos. Nesta etapa são gerados compostos gasos, líquidos (bio-óleo) e carvão. A ativação do carvão é atingida termicamente com a utilização de gases oxidantes como vapor acima de 800°C ou CO₂ à temperaturas mais elevadas (Çeçen e Aktaş, 2011).

O presente projeto de pesquisa tem como objetivo geral estudar a produção e caracterização de combustível líquido renovável (bio-óleo) e carvão ativado granulado a partir de resíduos da indústria cervejeira, o bagaço de malte seco e o creme de levedura centrifugada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Matérias-primas

O bagaço de malte úmido e o creme de levedura foram fornecidos por uma indústria cervejeira da região oeste do estado do Paraná – Brasil. O bagaço de malte foi seco a 105°C em estufa com circulação e renovação de ar (SOLAB modelo SL. 102/125) até que atingisse umidade inferior a 10%, e então armazenado em sacos plásticos. O creme de levedura foi homogeneizado, acondicionado em sacos plásticos e armazenados em um congelador vertical (BOSCH Intelligent freezer 32) a temperatura de $-5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. As matérias-primas foram caracterizada por meio da análise imediata (umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo) UNICAMP (2005).

2.2. Unidade experimental de pirólise/ativação

Para a realização dos experimentos de pirólise dos briquetes de bagaço de malte com levedura e ativação do carvão proveniente da pirólise, foi utilizada uma unidade experimental baseada nos estudos de Asadullah *et al.* (2007) sobre a pirólise do bagaço de cana-de-açúcar. A unidade experimental foi constituída de um forno mufla (Jung modelo 0212) com controle de temperatura, um reator confeccionado em aço inox com dimensões de 75 mm de diâmetro e 300 mm de altura e um sistema de injeção e controle de fluxo dos gases (N₂ e CO₂) composto de cilindros de gases, válvulas reguladoras de pressão e fluxômetro. Esse reator também possui poço de termopar localizado na tampa para efetuar o controle da temperatura do processo. Para o resfriamento e coleta dos gases condensáveis (bio-óleo) foram utilizados frascos kitassatos e um condensador resfriado com água corrente a temperatura ambiente.

2.3. Pirólise dos briquetes de bagaço de malte com levedura

O creme de levedura foi descongelado e centrifugado durante cinco minutos com velocidade de rotação de 1100 RPM. Em seguida foi retirado o sobrenadante (parte aquosa), restando o creme de levedura centrifugado (CLC).

Para a preparação dos briquetes, o BMS (previamente seco por duas horas à 105°C) foi misturado com o CLC utilizando-se a relação mássica bagaço:levedura de 1:1 e com o auxílio de uma prensa hidráulica de laboratório (SPECAC modelo GS15011), a mistura foi compactada aplicando-se uma pressão de 566 kgf.cm⁻², formando briquetes de 1,5 cm de diâmetro e 1,5 cm de comprimento.

Cerca de 100 g de briquetes foram colocados no reator e este inserido no forno. Iniciou-se o aquecimento com taxa de 10°C.min⁻¹, sob fluxo de 150 mL.min⁻¹ de N₂, até atingir 850°C, permanecendo nessa temperatura por uma hora. A mistura gasosa produzida durante a pirólise foi resfriada e recolhida por dois frascos kitassato. Após o término da pirólise o reator foi retirado do forno e esfriado com N₂, até atingir temperatura inferior a 100°C, sendo pesado o carvão pirolisado e os dois frascos kitassato. Os rendimentos em % (m/m) de líquido, carvão e gases foram determinados conforme as Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$\text{Carvão (\%)} = \left(\frac{m_{\text{carvão}}}{m_{\text{briquetes}}} \right) * 100 \quad (1)$$

$$\text{Líquido (\%)} = \left(\frac{m_{\text{líquido}}}{m_{\text{briquetes}}} \right) * 100 \quad (2)$$

$$\text{Gases (\%)} = \left(\frac{m_{\text{bagaço}} - (m_{\text{líquido}} + m_{\text{carvão}})}{m_{\text{briquetes}}} \right) * 100 \quad (3)$$

Para produzir uma quantidade de briquete pirolisado necessária para os ensaios com diferentes tempos de ativação foram realizadas 12 bateladas de pirólise mantendo-se os mesmos parâmetros de pirólise descritos anteriormente. Os líquidos condensados foram misturados e colocados em um funil de decantação para separação das fases.

2.4. Ativação dos carvões pirolisados

As amostras de briquetes pirolisados foram separadas em 4 partes. Uma delas não foi ativada (tempo de ativação igual a zero), enquanto as 3 restantes foram ativadas em diferentes tempos.

Para a ativação, os briquetes pirolisados foram previamente secos em estufa a 105°C, por 12 horas, e transferidos para o reator e aquecidos a uma taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹, sob fluxo de N₂ de 150 mL.min⁻¹, até a temperatura de ativação (850°C). Em seguida, o gás N₂ foi substituído pelo agente ativante (CO₂) com fluxo de 150 mL.min⁻¹ permanecendo por diferentes tempos de ativação (2, 4 ou 6 horas). O reator foi esfriado em atmosfera de N₂ até atingir temperatura inferior a 100°C. O percentual de *burn-off* e rendimento total foram calculados conforme as Equações 4 e 5, respectivamente. Os briquetes ativados foram moídos e peneirados, obtendo-se amostras de carvões ativados granulados com partículas entre 0,6 mm e 2,0 mm. As amostras de carvão ativado foram transferidas para frascos erlenmeyer e lavadas com solução de HCl 0,1M, sob agitação, durante 1 hora. Os carvões foram filtrados em papel filtro qualitativo, lavados com água destilada até atingir pH entre 4 a 5 e secos em estufa a 105°C durante 12 horas.

$$\text{Burn-off (\%)} = \left(\frac{m_{\text{carvão}} - m_{\text{carvão ativado}}}{m_{\text{carvão}}} \right) * 100 \quad (4)$$

$$\text{Rendimento Total (\%)} = \left(\frac{m_{\text{carvão ativado}}}{m_{\text{briquetes}}} \right) * 100 \quad (5)$$

2.5. Caracterizações dos produtos da pirólise e carvão ativado

O bio-óleo foi caracterizado em relação aos seguintes parâmetros:

- Perda de massa por evaporação: Aproximadamente 1,0 grama de bio-óleo foi transferida para cadinhos de porcelana e colocados em estufa com circulação de ar (SOLAB modelo SL. 102/125) a 105°C por 12 horas. As amostras foram esfriadas em dessecador e, em seguida, pesadas.
- Cinzas: As amostras usadas na determinação da perda de massa por evaporação foram calcinadas à 550°C por 2 horas em um forno mufla (Fornitec HW1000). As amostras foram esfriadas em dessecador por uma hora e pesadas.
- Densidade relativa: Foi calculada pela relação massa por volume utilizando um picnômetro de 10 mL.
- Poder calorífico: foi determinado através de uma bomba calorimétrica IKA-C2000 utilizando o método dinâmico, 25°C à 15 bar.

As amostras de carvão ativado foram submetidas às seguintes caracterizações:

- Caracterização da porosidade: Foi realizada por meio das isotermas de adsorção de N₂ a 77K usando um adsorômetro (QUANTACHROME, modelo NOVA1200). As áreas superficiais específicas e a distribuição de volume de poros foram determinadas pelo método BET e BJH, respectivamente.
- Índice de iodo: Foi determinado conforme o procedimento descrito pela NBR 3410.
- Adsorção de solução de Azul de metileno: aproximadamente 0,5 g de carvão ativado foi colocado em contato com 50 mL da solução de azul de metileno (200 mg.L⁻¹) mantidos sob agitação constante, a 30 °C, durante 48 horas em um agitador (OXYLAB modelo OXY-203). Após, a separação do CA, a concentração de corante remanescente foi determinada pela absorbância a 665 nm usando um espectrofotômetro UV-VIS THERMO SCIENTIFIC modelo Genesys10uv.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização das biomassas

Os resultados da análise imediata das biomassas (BMS e CLC) estão apresentados na Tabela 1. O bagaço de malte seco apresentou baixos percentuais de umidade (3,72%) e cinzas (3,8%) e alto teor de matéria volátil (73,18%). Resultados semelhantes foram observados por Mahmood *et al.* (2012), Carrier *et al.* (2012), Putun *et al.* (1999) e Putun *et al.* (1996) em estudos da pirólise do bagaço de malte, bagaço de cana, cascas de avelã e do bagaço do girassol, respectivamente. O CLC apresentou um alto percentual de umidade (75,73%) e

baixo teor de cinzas (1,31%). Quando comparado com o BMS, em base seca, pode se observar que os percentuais de matéria volátil, carbono fixo e cinzas são semelhantes.

Tabela 1 – Resultados das análises imediatas do Bagaço de malte seco e Creme de levedura centrifugada.

Composição	Bagaço de malte seco		Creme de levedura centrifugada	
	Base úmida	Base seca	Base úmida	Base seca
Umidade (%)	3,72	-	75,73	-
Matéria volátil (%)	73,18	76,01	18,99	78,21
Carbono fixo (%)	19,30	20,05	3,98	16,39
Cinzas (%)	3,80	3,95	1,31	5,39

3.2. Efeito do tempo de ativação sobre as características do carvão ativado

Para a realização deste estudo, foram realizadas 12 bateladas de pirólise de briquetes preparados com a relação de massa BMS:CLC de 1:1. Os rendimentos médio em carvões, líquidos e gases foram 25,42%, 62,53% e 12,05%, respectivamente.

O produto líquido resultante das 12 bateladas, apresentou separação em 3 fases, a fase inferior como a fração orgânica referenciada como bio-óleo. A fase intermediária foi denominada como a fração aquosa do produto líquido, enquanto a fase superior correspondeu a uma fração de emulsão contendo pequenas gotículas de bio-óleo. As três frações foram separadas e armazenadas em frasco âmbar, porém, apenas as frações intermediária e inferior foram caracterizadas. Os resultados das caracterizações das fases aquosa e orgânica estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterizações das fases aquosa e orgânica do produto líquido da pirólise

Propriedade	Fase aquosa	Fase orgânica(bio-óleo)
Densidade (g.mL ⁻¹)	1,034	1,047
Perda por evaporação (%)	93,09	31,96
Cinzas (%)	0,0030	0,0340
Poder calorífico (kJ.g ⁻¹)	*	31,186

* não houve ignição.

Verifica-se que a densidade do bio-óleo do BMS com CLC apresenta-se dentro da faixa de densidades dos bio-óleos apresentados por Özçimen (2013). A fase aquosa apresentou maior percentual de perda por evaporação (93,09%) que a fase orgânica (31,96%), devido ao elevado percentual de água na composição da fase aquosa, proveniente principalmente do CLC. Este elevado percentual de água pode justificar a ausência de ignição na análise do poder calorífico da fase aquosa. Segundo Czernik e Bridgwater (2004), a presença de água no bio-óleo possui efeito negativo ao diminuir o poder calorífico e promover a separação de fases. Os líquidos da pirólise geralmente apresentam uma fase, entretanto podem apresentar múltiplas fases devido à composição química original da biomassa como elevados teores de extrativos ou lignina, ou alto conteúdo de água. Embora este tipo de separação de fases não possa geralmente ser evitado, suas consequências podem ser minimizadas (Oasmaa e Peacocke, 2010). Os teores de cinzas das fases aquosa e orgânica foram 0,003% e 0,034%, respectivamente. Apenas o teor de cinzas da fase orgânica se encontra da faixa apresentada

por Özçimen (2013), entre 0,004 e 0,30%, enquanto o teor de cinzas da fase aquosa apresenta-se inferior a esta faixa. De acordo com Bridgwater (2004), baixos teores de cinzas no bio-óleo são esperados, pois as cinzas presentes no bagaço estão associadas ao carvão no término da pirólise. O poder calorífico da fase orgânica apresentou valor de $31,186 \text{ kJ.g}^{-1}$. Segundo Özçimen (2013), o poder calorífico esperado para o bio-óleo proveniente de biomassas encontra-se entre $13,85$ e $43,41 \text{ kJ.g}^{-1}$.

As amostras de carvões ativados preparados de acordo com os tempos de ativação de 0, 2, 4 e 6 horas receberam as denominações de CA0, CA2, CA4 e CA6, respectivamente. Na Figura 1 estão apresentados os percentuais de *burn-offs* para as amostras dos CAs em função dos diferentes tempos de ativação. Pode-se observar um comportamento linear entre o *burn-off* e o tempo de ativação. Comportamento semelhante também foi obtido por Demiral *et al.* (2011) ao estudar a influência dos tempos de ativação sobre o *burn-off* na produção de carvões ativados a partir de bagaço de oliva utilizando ativação física com vapor.

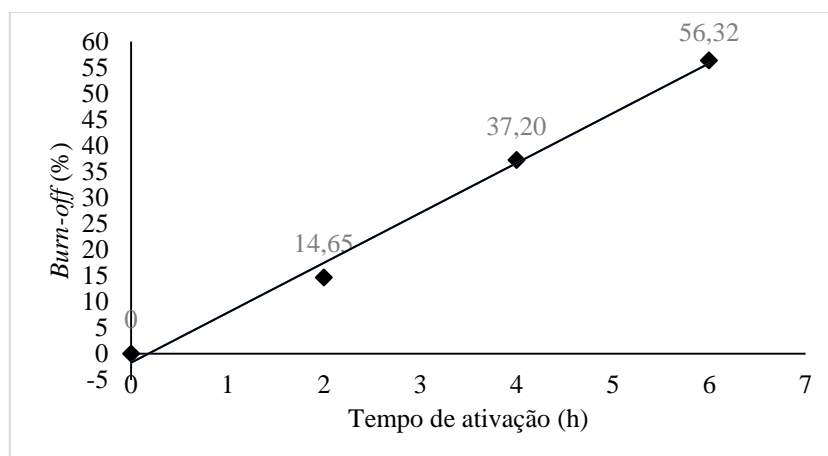


Figura 1 – Percentuais dos *burn-offs* das amostras de CA preparados em diferentes tempos de ativação (fluxo $\text{CO}_2 = 150 \text{ mL.min}^{-1}$, taxa de aquecimento $10^\circ\text{C.min}^{-1}$, temperatura = 850°C , tempo = 0, 2, 4 e 6 horas).

Na Tabela 3 estão apresentadas as caracterizações da porosidade, índice de iodo e adsorção de azul de metileno dos carvões ativados preparados com diferentes tempos de ativação.

Tabela 3 – Caracterizações da porosidade, índices de iodo e azul de metileno dos carvões ativados preparados com diferentes tempos de ativação.

Propriedade		CA0	CA2	CA4	CA6
Área de sup. esp. (BET) ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)		84,8	162,5	293,7	617,4
Volume de poro ($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$)	Microporo	0,0079 (27,4%)	0,0124 (35,4%)	0,0265 (30,1%)	0,0804 (34,7%)
	Mesoporo	0,0197 (68,3%)	0,0212 (60,5%)	0,0580 (65,8%)	0,1395 (60,2%)
	Macroporo	0,0013 (4,3%)	0,0014 (4,1%)	0,0036 (4,0%)	0,0118 (5,1%)
	Total	0,0288 (100%)	0,0350 (100%)	0,0881 (100%)	0,2316 (100%)

Diâmetro médio de poro (Å)	14,35	14,58	14,40	14,23
Índice de iodo (mg.g^{-1})	140,2	191,1	397,7	490,1
Descoloração azul de metileno (%)	28,34	32,45	99,85	99,97

A amostra CA0, que corresponde aos briquetes pirolisados, obteve a menor área superficial específica ($84,8 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$) e volume de poro ($0,0288 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$) indicando uma porosidade pouco desenvolvida. Pode-se observar que, com o aumento do tempo de ativação ocorre o desenvolvimento da porosidade indicada por um aumento na área superficial específica e no volume de poros. A amostra CA6 foi a que apresentou a maior área superficial específica ($617,4 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$) acompanhada com maior volume total de poro ($0,2316 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$).

As amostras de carvão ativado apresentaram predominância de micro e mesoporos com baixo volume em macroporos, assim como observado nos estudos envolvendo diferentes proporções de BMS e CLC. Constata-se também que as amostras apresentaram diâmetros médios de poros semelhantes também, com valor médio de $14,39 \text{ Å}$.

Pode-se observar que as propriedades adsorptivas dos carvões ativados, indicados pelo índice de iodo e descoloração de azul de metileno, foram aumentadas conforme o aumento no tempo de ativação. A amostra de carvão ativado CA6 apresentou melhor desempenho, alcançando um índice de iodo de $490,1 \text{ mg.g}^{-1}$ e descoloração da solução de azul de metileno a 200 mg.L^{-1} de 99,97%.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, pôde-se verificar que o bagaço de malte seco e o creme de levedura centrifugada apresentaram-se como matérias-primas de grande potencial para a produção de carvão ativado e bio-óleo.

No estudo com diferentes tempos de ativação pôde-se observar uma relação crescente no desenvolvimento das áreas superficiais e dos volumes de poros em função do aumento dos tempos de ativação. Usando-se 6 horas de ativação, foi possível obter um carvão ativado com área superficial específica de $617,4 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e volume total de poro de $0,2316 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$. Para esta amostra, o índice de iodo foi de $490,1 \text{ mg.g}^{-1}$ e o percentual de descoloração da solução de 99,97% de azul de metileno.

O produto líquido da pirólise apresentou múltiplas fases, separado em três frações: emulsão, aquosa e orgânica ou bio-óleo. O bio-óleo apresentou características semelhantes aos bio-óleos provenientes de outras biomassas, com poder calorífico de $31,186 \text{ kJ.g}^{-1}$.

5. REFERÊNCIAS

- AMAYA, A.; MEDERO, N.; TANCREDI, N.; SILVA, H.; DEIANA, C. Activated carbon briquettes from biomass materials. *J. Biores. Technol.*, v. 98, p.1635-1641, 2007.
- ASADULLAH, M; RAHMAN, M. A; ALI, M. M; RAHMAN, M. S; MOTIN, M. A; SULTAN, M. B; ALAM, M. R. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel*, v. 86, p. 2514 – 2520, 2007
- BRIDGWATER, A. V. Biomass fast pyrolysis, *Thermal Science*, v. 8, p.21-49, 2004.

- CARRIER, M.; HARDIE, A. G.; URAS, U.; GORGENS, J.; KNOETZE, J. H. Production of char from vacuum pyrolysis of South-African sugar cane bagasse and its characterization as activated carbon and biochar. *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 96, p.24-32, 2012.
- CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A. V. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy & Fuels*, v. 18, p.590-598, 2004.
- ÇEÇEN, F.; AKTAŞ, Ö. *Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment – Integration of Adsorption and Biological Treatment*. USA: Wiley-VCH, 2011.
- DEMIRAL, H.; DEMIRAL, I.; KARABACAKOGLU, B.; TUMSEK, F. Production of activated carbon from olive bagasse by physical activation. *Chem. Eng. Res. and Design*, v. 89, p.206-213, 2011.
- KIRIN HOLDINGS. Kirin Beer University Report. Global beer production by country in 2012. Disponível em: < http://www.kirinholdings.co.jp/english/news/2013/0822_01.html>. Acesso em: 20 mar. 2014.
- FERREIRA, I. M. P. L. V. O.; PINHO, O.; VIEIRA, E.; TAVARELA, J.G. Brewer's *Saccharomyces* yeast biomass: characteristics and potential applications. *Trends in Food Science & Technology*, v. 21, p.77-84, 2010.
- MAHMOOD, A. S. N.; BRAMMER, J. G.; HORNUNG, A.; STEELE, A.; POULSTON, S. The intermediate pyrolysis and catalytic steam reforming of Brewers spent grain. *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 103, p.328-342, 2012.
- MARSH, H.; RODRÍGUEZ-REINOSO, F. R. *Activated Carbon*. Elsevier Science, 2006.
- MUSSATO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, v. 43, p.1-14, 2006.
- OASMAA, A.; PEACOCKE, C. Properties and fuel of biomass-derived fast pyrolysis liquids. A guide. Espoo. VTT Publications, v. 731, p.1-79, 2010.
- ÖZÇİMEN, D. An approach to the characterization of biochar and bio-oil. LOHANI, S. P. *Renewable Energy for Sustainable Future*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013.
- PUTUN, A. E.; KOCKAR, O. M.; YORGUN, S.; GERÇEL, H. F.; ANDRESEN, J.; SNAPE, C. E.; PUTUN, E. Fixed-bed pyrolysis and hydrolysis of sunflower bagasse: Product yields and compositions. *Fuel Processing Technology*, v. 46, p.49-62, 1996.
- PUTUN, A. E.; OZCAN, A.; PUTUN, E. Pyrolysis of hazelnut shells in a fixed-bed tubular reactor: yields and structural analysis of bio-oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 52, p.33-49, 1999.
- RAFATULLAH, M.; SULAIMAN, O.; HASHIM, R.; AHMAD, A. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *J. Hazardous Materials*, v. 177, p.70-80, 2010.
- REINOLD, M. R. *Manual prático de cervejaria*. São Paulo: Aden Editora e Comunicações Ltda, 1997.
- RODRÍGUEZ-REINOSO, F. Effect of porosity and functionality of activated carbon in adsorption. ZHOU, L. *Adsorption: Progress in fundamental and application research*. China, Tianjin: World Scientific, 2006.

TOWNSLEY, P. M. Preparation of comercial products from brewer's waste grain and trub. MBAA Technical Quaterly, v. 16, p. 130-134, 1979.

UNICAMP. *Tecnologia da gaseificação*. Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, cap. 2, 2005.