

Melhoria do processo produtivo com a introdução da fase de aglutinação de polímeros

Improvement of the productive process with the introduction of the agglutination phase of polymers

Naldivan Barbosa Santos¹, Esdras Duarte dos Passos² e Sergio Fernandes de Freitas³, Luciano Galdino⁴

Resumo: A evolução das tecnologias e com os processos produtivos cada vez mais enxutos e eficientes, que utiliza como base a aplicação de ferramentas da qualidade, e indicadores de desempenho como forma de monitorar seus processos. Portanto é de suma importância que as empresas busquem evolução frente a seus concorrentes para não ficarem de fora do mercado. A alta na qualidade, podem trazer à organização uma considerável vantagem competitiva, reduz custos, desperdício, devoluções etc. Diante deste cenário o projeto tem como objetivo propor melhoria no acompanhamento do indicador estratégico na empresa de Polímeros de Termoplásticos, com relação à qualidade e produtividade, devido ao aumento da demanda de pedidos feitos pelos clientes, necessidade de identificar os tipos de falhas que mais reincidentem no processo produtivo.

Palavras-Chave: Processos de Aglutinação, Ferramentas de Qualidade, Termoplásticos, termorrígido.

Abstract: The evolution of technologies and the increasingly lean and efficient production processes, based on the application of quality tools and performance indicators as a way to monitor their processes. Therefore it is of the utmost importance that companies seek to evolve against their competitors so as out of the market. The high quality can bring to the organization a considerable competitive advantage, reduces costs, waste, returns etc. In view of this scenario, the project aims to propose improvement in the monitoring of the strategic indicator in the company Thermoplastic Polymers, with respect to quality and productivity, due to the increase in the demand for orders made by the clients, need to identify the types of faults that recur most in the Productive process.

Key-words: Agglutination process, Quality tools, Thermoplastics, Thermoset.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade é um valor que se agrega à "saúde" financeira da empresa e aumenta sua competitividade. Para tanto, apoiado num sistema de Informação, para obter qualidade é necessário criar e renovar um estilo de iniciativa e personalização do trabalho, incentivar e conscientizar a formação dos empregados, e conseqüentemente, excelência em prestação de serviços.

A matéria-prima para a produção de seus produtos da empresa são os materiais poliméricos. Os polímeros na sua maioria se dividem em caráter termoplástico ou termorrígido (ou termoestável). Os polímeros termoplásticos estão completamente polimerizados no seu estado bruto (como fornecido), não necessitando de reações químicas para o seu processamento. Nestes casos, a aplicação de calor produzirá um amolecimento destes polímeros atingindo sua temperatura *vítrea* (T_g), que pode chegar a sua fusão, que é a característica utilizada para o seu manuseio durante as operações de fabricação. Os polímeros termoestáveis não estão completamente polimerizados no seu estado bruto (como fornecido). A aplicação de pressão e/ou temperatura causa inicia reações químicas dentro do polímero que completa o processo de polimerização ou "cura" do polímero. Durante o processo de cura, ocorre a ligação entre as diferentes cadeias poliméricas originando uma estrutura interligada no espaço. Devido a esta forte interligação molecular, as moléculas não podem se deslocar entre si sem uma degradação permanente no material, impedindo-o de amolecer, mesmo com a aplicação de temperaturas mais elevadas, até certo grau, quando o calor começa a degradar a estrutura formada.

Para garantir um processamento de aglutinação satisfatório é necessário que as temperaturas de plastificação e as temperaturas de degradação de cada um dos componentes poliméricos sejam avaliadas no momento da escolha das temperaturas de processamento. A Tabela 1 mostra os principais plásticos, mostrando suas temperaturas de plastificação retiradas do Handbook of Plastics, Elastomers and Composites (HARPER, 1992).

¹ Centro Universitário ENIAC. Acadêmico do Curso Engenharia de Produção

²Centro Universitário ENIAC. Professor Doutor nos Cursos de Engenharia. e-mail: esdras.duarte@eniac.edu.br

³ Centro Universitário ENIAC. Acadêmico professor mestre do Curso de Produção, e-mail: sergio.fernandes@eniac.edu.br

⁴ Centro Universitário ENIAC. Acadêmico professor mestre em matemática, e-mail: luciano.galdino@eniac.edu.br

TABELA 1
TEMPERATURAS DE PLASTIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS.

Plástico	Ponto de Plastificação (°C)
PEBD	98 – 124
PEAD	130 – 137
PP	160 – 175
PS	74 – 105
Poliamida 6	210 – 220
Poliamida 6,6	255 - 265
Polimetil metacrilato	85 – 105
PVC	75 – 105
PC	150
PET	245 – 265

Fonte: (HARPER, 1992).

A empresa possui um portfólio de produtos dos mais diversificados e que continuam fazendo parte do dia-a-dia, além de um estoque permanente com mais de 800 toneladas de polímeros termoplásticos para atender as necessidades de cada cliente. A relação dos produtos fornecidos são: Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Poliestireno cristal granulado (GPPS), Poliamidas (PA 6 e PA 6.6.), Poliacetal Pom (POM), Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), Poliéster (PBT), Noryl (PPO) e Poliuretano (TPU):

II. DESENVOLVIMENTO

Apresentar a importância de aplicação das ferramentas da qualidade dentro do processo produtivo para aumentar a produtividade reduzindo as paradas nos ciclos de produção, assim como, minimizar o tempo de Aglutinação da matéria-prima (Processo escolhido para elaboração do estudo de caso). Uma das formas de eliminar ou até mesmo reduzir as fontes de variações presentes dentro do processo produtivo é utilizar-se das ferramentas, atingindo assim posteriormente metas e objetivos.

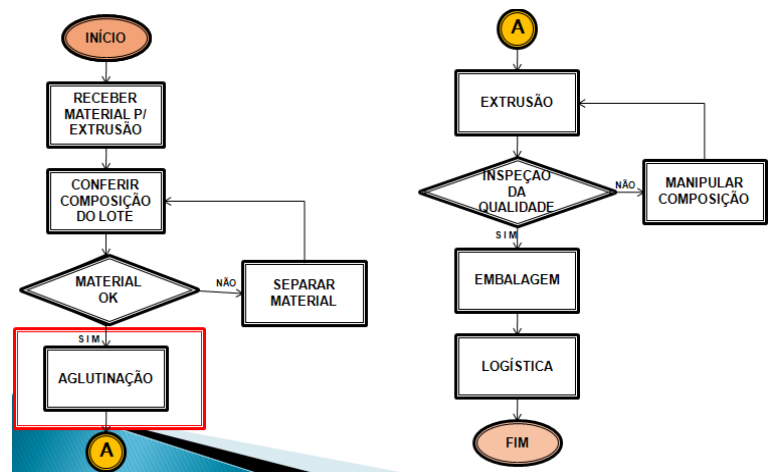
Atualmente o objetivo estratégico da qualidade é alcançar a fidelização do cliente com o produto fornecido ou serviço prestado. E certo dizer que com a medida que os clientes passam a confiar nos produtos e serviços recebidos, existe a possibilidade de sua fidelização.

Buscou-se reunir informações com o propósito de saber quais ferramentas da qualidade seriam mais eficazes para auxiliar e identificar os problemas e posteriormente eliminar. As ferramentas utilizadas o Brainstorming, Fluxograma do Processo para definição do problema, Gráfico Sequencial para medir o registro de paradas não programadas, Gráfico de Pareto para analisar as falhas mais frequentes em paradas não programadas, 5W2H para executar o plano de ação e as melhorias efetuadas e painel de indicadores para controlar e monitorar a continuidade das melhorias propostas. Através de

uma sequência lógica de procedimentos, baseado em dados e fatos, que objetiva localizar a causa fundamental dos problemas de um processo, desenvolvendo e implementando ações corretivas e melhorias.

O Mapeamento do Processo é uma ferramenta gerencial e de comunicação que tem a finalidade de ajudar a melhorar os processos existentes ou de implantar uma nova estrutura voltada para os processos. O objetivo é buscar um melhor entendimento dos processos e visualização das etapas que constituem o fluxo do processo produtivo e identificar o local de atuação para este trabalho (Aglutinação). Segue abaixo o mapa do processo da empresa.

FIGURA 1
MAPA DO PROCESSO DA EMPRESA.



Fonte: Autor (2016).

O equipamento de aglutinação da Empresa, é composto por duas facas rotativas inseridas na parte inferior de uma câmara oval, onde os polímeros são inseridos e agitados, onde ocorre a plastificação dos polímeros, em razão do atrito a temperatura é elevada. Água é injetada para refrigerar o material repetidamente fazendo com que o material se aglutine. A massa polimérica é retirada do aglutinador através da força centrífuga. Novamente o equipamento é preenchido com um novo material para uma nova aglutinação. O aglutinador funciona por batelada.

III. MÉTODOS

Neste trabalho utilizou a Metodologia de Análise e Solução de Problemas (MASP), a aplicação de ferramentas (Técnicas) como, Brainstorming e Fluxograma do Processo, Gráfico Sequencial, Gráfico de Pareto e 5W2H.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos após o diagnóstico do principal problema da produção da empresa:

A Figura 2 apresenta a ferramenta 5W2H utilizada na Linha 3 de extrusão de polímeros.

FIGURA 2
FERRAMENTA DE QUALIDADE 5W2H UTILIZADA NA LINHA 3 DE EXTRUSÃO.

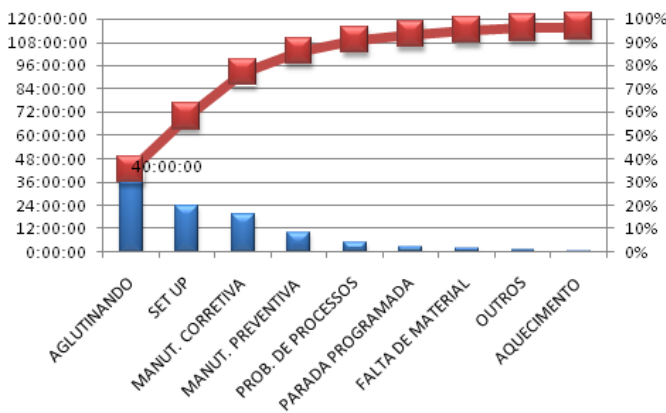
O que (What)	Quem (Who)	Onde (Where)	Por que (why)	Quando (when)	Como (how)	Quanto (How much)
Granulação de plásticos reciclados	Assistente da produção	Produção	Devido o aumento da demanda.	Em andamento	Reativando a estufa	R\$ 3.000,00
Aquecer a Matéria-prima	Naldivan	Extrusora Linha 3	Melhoria do processo produtivo	Finalização 15/06/2013	Manutenção	Gasto mensal de eletricidade

Fonte: Autor (2016).

O aumento da produtividade foi constatada com o Diagrama de Pareto, apresentados nos Gráfico 2 na Linha 3 extrusão de polímeros. A proposta de melhoria foi de minimizar o tempo de aglutinação (secagem) da matéria-prima na Linha 3, reativando uma estufa para realizar o processo de secagem, assim a extrusora não precisaria aguardar cerca de 4 horas para começar a produzir.

No Gráfico 1 apresenta no Diagrama de Pareto antes das implementações da ativação do processo de secagem, tendo uma perda de 40 h/mês para aquecer a matéria-prima.

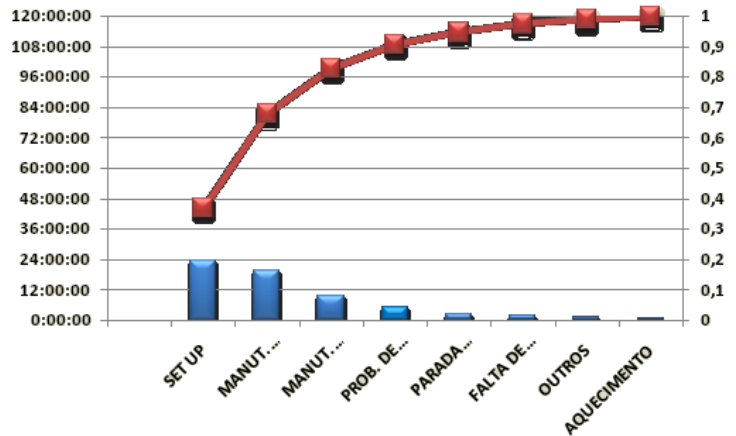
GRÁFICO 1
DIAGRAMA DE PARETO ANTES DAS IMPLEMENTAÇÕES.



Fonte: Autor (2016).

No Gráfico 2 apresenta a Linha 3 de extrusão de polímeros, após a reativação do processo de secagem, permitindo o material polimérico fazer a aglutinação antes de entrar na Linha 3.

GRÁFICO 2
DIAGRAMA DE PARETO APÓS AS IMPLEMENTAÇÕES



Fonte: Autor (2016).

Em 220 horas de trabalho mensal, a extrusora linha 3, produzia 57 Kg/h, com uma produção total de 14.712 Kg de polímeros, após a melhoria e a meta alcançada na redução de 40 horas de aglutinação, somou-se estas 40 horas na linha de extrusão e consequentemente um aumento na produção de polímeros de 16.992 Kg mensal. Essa totalidade gera ao ano é 20,4 toneladas, isto é a mais que a produtividade do ano anterior.

V. CONCLUSÃO

A implementação das ferramentas de qualidades como, por exemplo 5W2H e Diagrama de Pareto foram fundamentais para análise do processo de aglutinação. Mostrando a importância de reativar no processo da Empresa a fase de aglutinação. Obtendo um ganho considerável no resultado da produção de polímeros.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] BANDEIRA A. A; *Indicadores de desempenho: Instrumento à produtividade organizacional*. Qualitymark, Rio de Janeiro, 2009.
- [2] FEIGENBAUM, A; *Controle da Qualidade Total*, São Paulo-SP: Makron Books, v.1., 1994.
- [3] VIEIRA, S; *Estatística para a Qualidade*, Rio de Janeiro: Elsevier, 3.ed; 2014.
- [4] BRANDRUP, J.; BITTMER, M.; MICHAELL, W.: MENDES, G. *Recycling and Recovery of Plastics*. Munchen: Ed. Carl Hanser Verlag, 893p, 1996.
- [5] CALLISTER, W.D.; *Materials science and engineering*. John Wiley & Sons Inc., 4th edition, 1997.
- [6] GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- [7] YOSHINAGA, C. *Qualidade Total*. São Paulo: s.n. 1988.

- [8] PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.
- [9] SLACK, N. C. S.; JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- [10] TAKASHINA, N. T.; FLORES, M. C. *Indicadores da qualidade e do desempenho*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.
- [11] VIEIRA, S. *Estatística para a qualidade*, 3.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [12] HARPER, C.A. *Handbook of Plastics, Elastomers and Composites*. München: 2nd Ed.Mc Graw- Hill, 1992.

CONTROLE DE POSICIONAMENTO DE UM ATUADOR HIDRÁULICO VIA INTERNET

Control of a hydraulic cylinder's positioning by using internet

D. Oliveira¹, P. C. S. Emanuel², A. J. C. Pitta³, M. A. V. Oliveira⁴, E. D. Orellana⁵, R. B. Zoadelli⁶

Resumo: A O presente trabalho foi desenvolvido sobre a proposta do desenvolvimento de um sistema de controle de posicionamento de um atuador hidráulico, pelo uso de um micro controlador PIC18F4431 através de uma interface com Androide conexão via internet. Para isso contou-se com o uso de uma válvula proporcional, o que envolveu inúmeros testes para sua compreensão, simulações das programações de controle com uso do software Proteus bem como todo um projeto de realimentação do sistema de controle contando com o desenvolvimento de uma estrutura de encoder linear adaptado, que pode ser feita com auxílio de uma impressora de três dimensões (3D). Ressalta-se que para o controle utilizou-se da lógica proporcional e integral e derivativa (PID), sendo necessários testes para a regulação dos termos matemáticos utilizados, obtendo como resultados finais apenas a aplicação do controle PI, criação do aplicativo e conexão com a internet.

Palavras-chave: Posicionamento; atuador hidráulico; controle PI.

Abstract: This work was developed by the purpose of the development of a hydraulic cylinder positioning's control, by the use of a PIC18F4431 microcontroller using an Android interface with an internet connection. For this, it was counted with the use of a proportional valve, which involved several tests to its comprehension, simulations of the programmations of control with the use of the software

Proteus, as all a feedback control system's project counting with the development of an adapted linear encoder, that could be done with help of an three dimensional (3D) printer. It stands out that for the control it was used the proportional, integrative and derivative (PID) logic, being necessaries tests of the regulation of the mathematical used terms, obtaining only de application of the PI control, development of the application and connection to the internet.

Keywords: Composite; Positioning; hydraulic cylinder; PI control. I. INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

Os sistemas hidráulicos oferecem grandes potências com confiabilidade, rapidez e eficiência (ANDRIGHETTO, 1996). Visto isso são objetos de diversos estudos principalmente no que diz respeito a métodos para seu controle. Segundo Fialho (2002), eles apresentam-se como alternativas aos sistemas mecânicos e elétricos uma vez que são mais maleáveis na aplicação de grandes esforços em pequenas áreas. Além disso, têm também vantagens como: fácil instalação, rápida inversão de movimento, ajustes em escala micrométrica, auto lubrificação, etc.

Quanto ao seu controle destaca-se o emprego usual de válvulas do tipo ON-OFF, servoválvulas ou válvulas proporcionais. As primeiras mostram-se como uma opção limitada visto que dispõe ao sistema apenas dois estágios de fluxo do fluido, tornando-se conseqüentemente digitais: funcionam totalmente abertas ou fechadas. Quanto às servoválvulas, acabam sendo opções de alto custo e difícil manutenção (LAI; CHEN, 1992). Visto isso, as válvulas proporcionais inferem em maiores vantagens já que, além de assumirem posições intermediárias, mediante variação de corrente de entrada em seus solenoides, têm também menores custos.

1. Doutor em História das Ciências, Pesquisador e Coordenador do Núcleo de Pesquisa do Centro Universitário ENIAC. E-mail: daniel.oliveira@eniac.edu.br

2. Doutor em Engenharia Biomédica, professor da Faculdade de Tecnologia Termomecânica. profpemanuel@gmail.com

3. Mestre em Engenharia Elétrica, professor titular da Faculdade de Tecnologia Termomecânica e-mail: ajpitta@uol.com.br

4. Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, mestrando em Biotecnociências pela UFABC. E-mail: moliveira@cefsa.edu.br

5. Graduada em tecnologia em Mecatrônica Industrial pela Faculdade de Tecnologia Termomecânica. E-mail erika.brassel.inca@gmail.com

6. Graduado em tecnologia em Mecatrônica Industrial pela Faculdade de Tecnologia Termomecânica. E-mail rodrigo.bonilha1@gmail.com

A determinação dessa corrente dá-se pelo auxílio da eletrônica que conforme Canuto et al (2013, p. 2 apud D., 1996) há mais de 10 anos integra-se com os sistemas hidráulicos, ofertando-lhes maior configurabilidade, facilidade de ajustes paramétricos, capacidade de análises diagnósticas e monitoramento. Assim, válvulas simples resultam em inteligentes dispositivos de controle que podem ser ainda mais incrementados com o uso de microcontroladores (BOES, 200-), “quando usadas com controladores eletrônicos, fornecem um altonível de controle, que era impossível de ser alcançado em sistemas hidráulicos mais antigos” (ANDRIGHETTO, 1996, p. 1 apud GRAEBERT, 1991). A chamada “internet das coisas” (IOT, em sua sigla em inglês) vem interconectando cada vez mais pessoas e computadores, dando um acesso mais cômodos sistemas e controles num processo de automação reativo. Nada mais interessante que uma proposta de sua inclusão no controle de sistemas como os hidráulicos. Conforme Boes (200-) ajustes e determinações de parâmetros em válvulas hidráulicas podem ser feitos a milhares de quilômetros por acesso remoto, o qual seinterpreta também como tecnologia Wireless (sem fio).

Perante isso, a proposta de um sistema de controle sem fio IOT, utilizando-seum microcontrolador e uma válvula proporcional têm grandes motivações, destacando-se: o já citado custo elevado de servoválvulas e válvulas ON-OFF; a falta de literatura na área, visto que a maior parte das informações referentes ao uso e aplicação das válvulas proporcionas é obtida de catálogos de fabricantes (ANDRIGHETTO, 1996), o que gera novas informações; o incremento nas pesquisas de não-linearidades e seu consequente controle; a modernização desse tipo de sistema por meio do uso da internet em substituição ao amplamente utilizado, bluetooth; o contato com novos componentes eletrônicos em expansão, que é o caso dos módulos wireless; entre outras motivações.

Dessa forma, o projeto teve como objetivos a realização do controle de posicionamento, projeto de um

sistema de leitura para realimentação do sistema de controle por meio de um sensor do tipo encoder, emprego das ações de controle proporcional, integral e derivativa e desenvolvimento de um aplicativo para o envio dos dados de comando do atuador hidráulico via internet.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A plataforma Androidé um dos sistemas operacionais mais utilizados no mundosendo que em 2014, cerca de três bilhões de aparelhos dispunham da plataforma. Unidaà chamada Internet das Coisas, auxilia no incremento da tecnologia ao cotidiano das pessoas e resulta na simplificação e maior velocidade de diversas atividades.

Para oprojeto propôs-se o uso de um módulo WiFi do tipo ESP, de modo a que se efetuasse o controle pela internet por meio de um aplicativo em Android. Tal módulo é configurado através de comandos básicos do tipo AT (do inglês attention), e possui fisicamente pinos de alimentação e de envio e recepção de dados via comunicação serial. Essa configuração inicialpode ser facilmente realizada pelo uso de uma placa Arduino, a qual dispõe de um microprocessador, memórias internas, temporizadores, contadores e outros, sendo um microcontrolador extremamente versátil.

Com relação à hidráulica, esta tempor princípio o deslocamento de óleo para a movimentação de atuadores, bombas, válvulas, entre outros, ofertando grandes forças aos sistemas. Já a chamada hidráulica proporcional tem como principal característica o uso deválvulas proporcionais que controlam o fluxo de fluido para a determinação precisa de velocidade e posição de um atuador, por exemplo.

Uma válvula proporcional é constituída por dois solenoides magnéticos deslocados conforme a entrada de corrente, a qual gera uma força magnética proporcional que permite um controle preciso de posição. Essa entrada variável de corrente pode ser obtida com uso das chamadas

pontes H, circuitos com transistores responsáveis por aumentar dadas correntes – fornecidas por um PIC ou Arduino, por exemplo – de modo a não prejudicarsuas portas que oferecem uma corrente limitada, permitindo o acionamento simultâneo de dois motores, por exemplo, controlando os sentidos de giro de cada um e também suas velocidades com auxílio de pinos de modulação de largura de pulso (PWM em sua sigla em inglês).

Tais válvulas normalmente são controladas por controladores lógicos programáveis (CLPs) e outros de grande ou igual porte. Entretanto, o uso de microcontroladores para o controle dessas pontes, e indiretamente das válvulas, é mais viável. Dispondo de circuitos internos como conversores analógico/digital, temporizadores, comparadores, interfaces de comunicação e PWMs, são programáveis e reprogramáveis, com grandes capacidades de armazenamento que permitem os mais variados tipos de controle, podem ser exemplificados pelas placas Arduino ou microcontroladores da família PIC. Estes últimos dependem de uma programação em linguagem C e podem ser simulados em softwares como o Proteus.

Entretanto, sistemas de controle exigem uma realimentação, muitas vezes realizada por um encoder, de modo a corrigir erros e gerar saídas precisas. O encoder é um sensor de posicionamento que utiliza uma fita transparente com riscos pretos igualmente espaçados e um sensor constituído por um led emissor e receptor de luz. Quando o led emite a luz pela divisão transparente, o receptor gera um pulso de estado lógico 1. Já quando o emissor emite luz no risco preto, ele envia um pulso para o microcontrolador de estado lógico zero. O PIC interpreta esses pulsos mandando o atuador para a posição desejada, por meio de um algoritmo de controle que pode ser do tipo proporcional – que gera uma correção proporcional ao erro –, integral – proporcional ao produto do erro pelo tempo – e derivativo – proporcional à taxa de variação do erro

–(PID), um dos mais utilizados na indústria.

2. METODOLOGIA

Para o controle de posicionamento proposto, diferentes partes do projeto tiveram de ser definidas com base em critérios como: facilidade de manuseio, acessibilidade, especificações técnicas, entre outras.

Como um conjunto complexo, seu funcionamento pode ser basicamente compreendido da seguinte forma: o aplicativo Android define o valor de posicionamento desejado por meio de um botão deslizante, bem como estabelece a conexão à internet através dos dados de número de porta de conexão (80) e IP do módulo ESP8266-01; o valor de posicionamento é recebido pelo módulo, que fora previamente configurado com auxílio de uma placa Arduino, e repassado ao microcontrolador PIC18F4431 por comunicação serial; este por sua vez é responsável por variar duas saídas PWM que modificam as tensões de saída da ponte H L298; as duas saídas variáveis desse driver de potência variam por consequência as correntes de entrada dos solenoides da válvula proporcional; esta, a partir da mudança de corrente, resulta na variação de vazão que gera o deslocamento da haste do atuador até a posição definida; um sensor encoder linear é responsável por fazer a leitura da posição alcançada e gerar dados ao algoritmo PID interno à programação do microcontrolador; esse então efetua as correções necessárias realizando o controle através das constantes preestabelecidas para nos cálculos matemáticos PID.

Inicialmente determinou-se o sistema hidráulico composto basicamente pelo tanque, válvula proporcional, atuador simples de dupla ação e bomba hidráulica. A escolha do PIC18F4431 decorreu da existência de canais de leituras de encoder internos a esse microcontrolador e a presença de 8 portas PWM, bem como a existência do protocolo UART para comunicação serial.

Quanto ao módulo de potência, frente à necessidade de duas saídas independentes de tensão, com capacidades suficientes ao dimensionamento proposto, optou-se pela ponte H L298. Seu uso, entretanto, dependeu de inúmeros e variados testes, de modo a compreender-se seu comportamento unido à válvula, e resposta às variações dos PWMs. Disso concluiu-se a necessidade de um circuito de optoacopladores para eliminação de ruídos das saídas PWM do PIC e isolamento do sistema de controle do sistema de potência. Também se depreendeu que, perante características específicas da válvula utilizada, era necessária uma tensão de 1,9V e uma corrente de 50mA à solenoide responsável pelo avanço do atuador, e de 2,6V e 67mA à solenoide de retorno, sendo que após a saída da inércia, o atuador passava a exigir valores menores de 1,3V e 37mA para continuidade de seu movimento.

O módulo WiFi escolhido foi o ESP8266-01, devido ao seu baixo custo, relativa facilidade de programação e crescente uso. Sua configuração pode ser feita através de uma programação simples via comunicação serial entre este e o Arduino, pela qual era possível o envio de comandos AT em seu monitor serial. A conexão passou então a depender do aplicativo.

O desenvolvimento desse último ocorreu de maneira concomitante à configuração do módulo, pela plataforma App Inventor, o qual disponibilizou um link para download do mesmo. Sua estrutura básica dispõe ao desenvolvedor uma interface de programação em blocos e outra referente ao seu design. O resultado final do aplicativo pode ser visto na figura a seguir, onde se veem os espaços destinados aos dados para conexão, o botão deslizante e caixa de texto indicando o valor de posição alcançado.

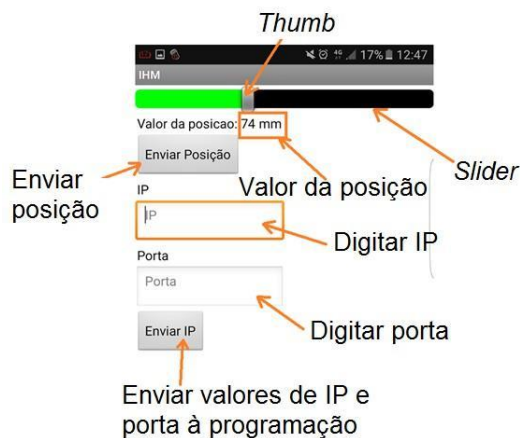


Figura 1 - Estrutura do aplicativo.

Fonte: Própria, 2016.

Com relação ao encoder, adaptou-se uma fita encoder de uma impressora. Estapor sua vez contou com suportes projetados e um foto-emissor e receptor para constituir então um encoder linear – visto que o deslocamento do atuador é também linear. Foram realizados ajustes e testes para obtenção de sua resolução sendo que o foto-emissor e receptor fora acoplado ao batoque do atuador de modo a acompanhar seu deslocamento.



Figura 2 - Sistema encoder.

Fonte: Própria, 2016.

Ao canal 2 do encoder acrescentou-se um circuito com um amplificador BC547, visto que a tensão que fornecia ao microcontrolador era muito baixa para sua correta leitura.

Ao fim, desenvolveu-se o algoritmo de controle com apenas as ações proporcional e integrativa na programação do PIC, na qual se determinou também, a critério de teste, que ao alimentar-se o sistema, o atuador fosse deslocado a uma

posição intermediária ao seu curso total, de modo a realizar uma espécie de calibração e referenciamento.

3. RESULTADOS

O término do trabalho deu-se com a execução do referenciamento do sistema a partir de um setpoint automático embutido na programação final do microcontrolador, o que significou o total funcionamento das ações de controle proporcional e integrativa desenvolvidas.

Além disso, com relação à IHM via aplicativo, conseguiu-se enviar o dado do Arduino ao PIC, porém, a programação deste último acabou apresentando falhas quanto ao tratamento do dado recebido, não sendo possível então, a visualização da mudança de posição do atuador com o envio da posição desejada pelo celular.

Entretanto, verificou-se que com os circuitos auxiliares do transistor e optoacopladores, o sistema de potência e controle se comportou muito melhor com relação às respostas desejadas. Incluiu-se um resistor de $10K\Omega$ entre o TX do Arduino e o RX do módulo Wifi, de modo a que fosse reduzido o valor da tensão de entrada no ESP8266, para que o componente não queimasse visto que sua tensão máxima de alimentação é limitada até 3,3V.

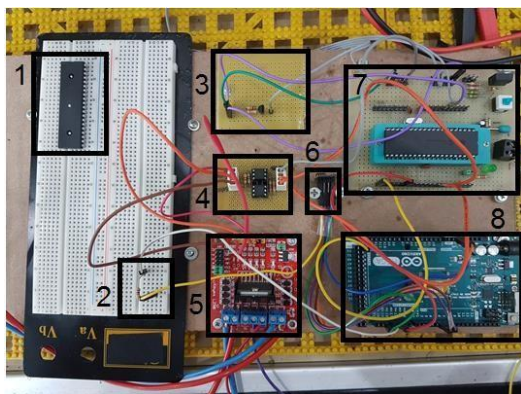


Figura 3 – Circuito de controle completo.

Fonte: Própria, 2016.

1 – PIC reserva;

2 – Resistor entre ESP e Arduino;

3 – Circuito amplificador;

4 – Circuito de optoacopladores;

5 – Ponte G L298;

6 – Módulo ESP8266;

7 – Circuito PIC18F4431;

8 – Arduino.



Figura 4 – Sistema finalizado.

Fonte: Própria, 2016.

4. CONCLUSÃO

Os projetos desse porte exigem o conhecimento de inúmeros componentes e de suas características comportamentais. A falta de pesquisas na área – e/ou dificuldade de acesso às mesmas – resulta numa relevante questão que é justamente a falta de informações e literatura na área de hidráulica proporcional e seu controle através de sistemas menos robustos e mais acessíveis, sendo necessários inúmeros testes apenas para a compreensão da válvula proporcional utilizada, perante a ausência de referências e comprovações para os resultados obtidos.

Embora a ideia de trabalharem-seas diversas partes do sistema proposto de forma concomitante e mais produtiva, um trabalho assim exige um desenvolvimento

prático minucioso que priorize o funcionamento total de cada parte, ou seja, desenvolver-se o projeto a pequenos passos.

É importante ressaltar-se que o sistema proposto teve um caráter modular, o que significou que dispunha de inúmeras partes que isoladamente funcionavam, mas que ao serem unidas exigiu-se grande atenção e inúmeros testes, o que acabou resultando numa bagagem de conhecimento ampla.

Um projeto desse porte merece uma continuidade e tem grandes chances de ser aplicado industrialmente, além de ser um excelente fomento às pesquisas na área e fornecer diversas informações àquelas que sejam correlatas. Além disso, apresenta-se como um excelente exemplo da tecnologia esperada na chamada

4ª Revolução Industrial, defendida como a era da internet, mobilidade e rapidez no envio, tratamento e recebimento de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIGHETTO, Pedro Luís. POSICIONADOR ELETRO-HIDRÁULICO CONTROLADO POR VÁLVULA PROPORCIONAL DIRECIONAL . 1996. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/76994/103928.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 27 ago. 2016.

BOES, Christoph. The advantages of new proportional and servo valves with integrated digital electronics. Moog Technical Papers. [S.I.], p. 1-12. [200-]. Disponível em: <<http://www.moog.com/literature-search/industrial-group-literature-library/moog-technical-papers/>>. Acesso em: 27 ago. 2016.

CANUTO, Enrico et al. Proportional electro-hydraulic valves: from analog to digital control. International Journal Of Mechatronics And Automation , Torino, 13, Oct. 2013, p. 93-103. Disponível em: <<http://porto.polito.it/2517304/>>. Acesso em: 27 ago. 2016.

FIALHO, Arivelto Bustamante . Automação Hidráulica: Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos. São Paulo: Érica, 2002. 262 p.

GRAEBERT, Eric. Electrohydraulics: motion control alternative for today and tomorrow. Control Engineering. New York, p. 66-73. fev. 1991.

LAI, Jiing-yih; CHEN, Yuan-rong. Adaptive flow rate control of a hydraulic proportional valve. Jsme International Journal. Tokyo, p. 582- 590. dez. 1992. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1988/35/4/35_4_582/_article>. Acesso em: 29 ago. 2016.

PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE COZINHA USADO: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL

BIODIESEL PRODUCTION FROM THE USED KITCHEN OIL: A SUSTAINABLE ALTERNATIVE

J. H. M. Tambor¹, F. V. Cwejgorn², A. G. Santos, G. C. Lopes e V. P. Lescano³, V. H. Soares⁴

Palavras-chave: Biodiesel; óleo de cozinha usado; sustentabilidade

Resumo: Vários fatores justificam a pesquisa e a adoção de fontes alternativas de geração de energia. As alterações climáticas no Planeta, propiciadas em boa parte pelo uso de transportes dependentes de combustíveis de origem fóssil, os graves danos à saúde da população, oriundos da inalação de gases, com destaque ao carbônico e a já anunciada finitude do petróleo, do gás mineral e do carvão. A par desta situação, o esgotamento do potencial energético de resíduos minimiza impactos ambientais na obtenção de matéria prima e quando reaproveitamos o óleo de cozinha também evitamos o descarte incorreto. Daí porque os biocombustíveis surgem como uma alternativa viável de fonte renovável e com baixos índices de emissão de poluentes. Não se ignora a existência e o emprego do biodiesel a partir da reação óleo vegetal com metanol e etanol. Entretanto, há que se reconhecer que tais álcoois também apresentam problemas. O primeiro, por seu inegável potencial tóxico. O segundo, de origem vegetal, por exigir grandes áreas cultivadas, justamente num momento em que a população mundial carece de mais alimentos. Assim, apresentamos a utilização do óleo de cozinha usado, na geração do biodiesel, mostramos com isso a facilidade de sua síntese que não requer grandes investimentos e conhecimentos químicos para sua execução que, neste caso, foi realizada por alunos de cursos não relacionados diretamente à área de química. Pode-se alcançar à condição de matéria prima, para fabricação de um combustível tão eficiente quanto os combustíveis de origem fóssil, porém, muito menos agressivo ao Meio Ambiente.

Abstract: Several factors justify the research and adoption of alternative sources of energy generation. Climate change on the planet, which is largely due to the use of transport dependent on fossil fuels, the serious damage to the health of the population due to the inhalation of gases, especially carbon dioxide and the already announced finite oil, mineral gas and coal. The depletion of the energy potential of waste minimizes environmental impacts in the obtaining of raw material and when we reuse the kitchen oil we also avoid the incorrect disposal in the sewage network. That is why biofuels appear as a viable renewable source with low pollutant emissions. The existence and use of biodiesel from the vegetable oil reaction with methanol and ethanol is not ignored. However, it must be recognized that such alcohols also present problems. The first, for its undeniable toxic potential. The second is of plant origin, because it requires large cultivated areas, precisely at a time when the world population needs more food. Thus, we present the use of used cooking oil in the generation of biodiesel, we show the ease of its synthesis, which does not require large investments and chemical knowledge for its execution, which in this case was carried out by students from courses not directly related to the Area of chemistry. It is possible to reach the condition of raw material, for the manufacture of a fuel as efficient as the fuels of fossil origin, but much less aggressive to the Environment.

Keywords: Biodiesel; used cooking oil; sustainability

¹ Pós-doutor em Biotecnologia, Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, São Paulo, Brasil, E-mail: jose.humberto@eniac.edu.br

² Especialista em Perícia, Auditoria e Gestão Ambiental, Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, São Paulo, Brasil, E-mail: fabio.valdecioi@eniac.edu.br

³ Alunos de graduação em Engenharia Mecatrônica, Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, São Paulo

⁴ Doutora em Neurociências, Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, São Paulo, Brasil, E-mail: vania.haddad@eniac.edu.br

I. INTRODUÇÃO

No momento atual, vivenciamos alterações climáticas em todo o Planeta, justificadas basicamente pelo excesso de emissões de poluentes, por atuação antrópica.

De acordo com Oliveira e Vecchia, as atividades humanas resultam nas emissões de quatro principais gases de efeito estufa (GEE): gás carbônico, metano, óxido nitroso e halocarbonos.

O IPCC, em seu estudo de 2004 [1], apresentou a distribuição proporcional setorial das emissões de GEE, sendo que o abastecimento de energia e o transporte responderam por quase 40% do total.

O relatório “World Energy Trends 2011” [2], por sua vez, apontou que a atividade humana, responsável pela elevação do nível de emissão dos GEE, atingiu a casa dos 62% de emissões de CO₂ oriundas de combustíveis fósseis [3].

Portanto, há uma inegável relação entre o gás carbônico, o mais importante gás de efeito estufa, e a atividade humana de transporte, sobretudo com a utilização de veículos impulsionados por combustíveis de origem fóssil.

Some-se ao problema das alterações climáticas a circunstância de que a inalação de gases de emissão automotiva não faz bem à saúde e já representa um complexo e custoso problema público.

Ainda assim, a saúde pública é raramente levada em conta quando da definição de políticas de combustível ou transporte, uma vez que os veículos, em última análise, são objeto de desejo e não de ameaça.

Recorde-se que o próprio governo brasileiro, quando implementou o programa de etanol combustível, o fez mais com vistas ao aspecto econômico, do que propriamente por preocupação com seus efeitos sobre a saúde.

Por derradeiro, também não se pode esquecer que estudos indicam que o pico da produção do petróleo e do carvão devem ocorrer entre 20 e 30 anos. Já o gás, especialmente o de xisto, deve demorar no máximo uns 50 ou 100 anos.

A IEA (*International Energy Agency*) divulgou o relatório World Energy Outlook [4], mostrando que vai haver um crescimento da produção de combustíveis fósseis nas próximas décadas e os EUA podem se tornar uma nova Arábia Saudita na produção de energia fóssil.

Todavia, isso não se traduz exatamente num benefício econômico e ambiental, já que haverá um atraso na transição para uma matriz de energia limpa, além de agravar os problemas de aquecimento global

A partir daí, portanto, a tendência deve ser de um declínio irreversível das mencionadas fontes de energia, que não será suportada nem mesmo pela elevação dos preços, decorrente do aumento dos custos de produção.

Portanto, impõe-se pensar e adotar medidas urgentes para utilização de fontes energéticas, tão eficientes quanto àquelas de origem fóssil, porém renováveis e menos poluidoras.

A. Biodiesel

O biodiesel é uma opção sustentável na geração de biocombustíveis pois a sua matéria prima pode ser vegetal ou animal. Além do uso do óleo cru, extraído diretamente das oleaginosas, o óleo de cozinha usado e os rejeitos de gordura de abatedouros e frigoríficos funcionam como matéria prima ainda mais sustentável pois promovem uma destinação adequada para descartes de alto impacto.

A conversão de óleos e gorduras em biodiesel e glicerina se dá por meio de uma reação de transesterificação catalisada por uma base:

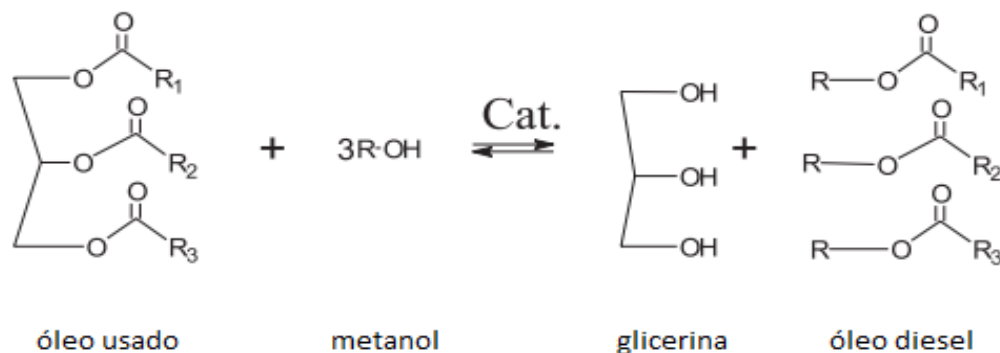


Figura 1: Reação de transesterificação. Produção de biodiesel pela reação de um triglicéride (óleo) com 3 moléculas de álcool na presença de um catalisador (uma base ou um ácido). Este processo gera 3 moléculas de ésteres (biodiesel) e uma de glicerina. (modificada [5]).

Mesmo com vários pontos positivos para sua produção sustentável, este biocombustível apresenta como ponto negativo o seu valor de emissão de NO e NO₂ (NO_x), com excelentes reduções de MP (material particulado), CO (monóxido de carbono) e HC (hidrocarbonetos) [6]. O destaque na redução de emissões deve-se ao MP que apresenta toxicidade, principalmente o material mais fino, quando este se aloja nos pulmões e leva a doenças fatais [7] (Experimental Modeling of NO_x and PM Generation from Combustion of Various Biodiesel Blends for Urban Transport Buses).

B. Referencial teórico

Em meados da década de 1.980, a Assembleia Geral das Nações Unidas encomendou à Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, um relatório que apresentasse uma “agenda global para mudança.”

Dita Comissão, presidida pela então primeira ministra norueguesa Gro Harlem Brundtland, publicou em 1.987 o relatório intitulado Nosso Futuro Comum (*Our Common Future*).

Além de estabelecer o conceito de Desenvolvimento Sustentável, como sendo aquele que atende às necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade das gerações futuras suprirem suas próprias necessidades, o relatório também criticou o modelo de desenvolvimento adotado pelos países industrializados e destacou o risco do uso excessivo de recursos naturais, sem considerar a capacidade de suporte dos ecossistemas.

Dentre as soluções apontadas pelo relatório constam a limitação do crescimento populacional, a garantia de recursos básicos a longo prazo, a diminuição do consumo de energia, o desenvolvimento de tecnologia para uso de fontes energéticas renováveis, o aumento da produção industrial nos países não industrializados, o controle da urbanização desordenada, a integração entre campo e cidades menores e o atendimento das necessidades básicas.

Ou seja, há pelo menos 3 décadas a ONU se preocupa com o desenvolvimento e emprego de fontes energéticas renováveis.

O lixo e outros rejeitos tem se tornado um problema mundial devido à sua constante e crescente produção e as áreas para sua destinação final. Um dos esforços principais é a conversão do lixo em energia de uma maneira eficaz. Mas mesmo as formas mais modernas como a incineração, gaseificação, gaseificação por plasma e pirólise ainda apresentam problemas. Uma das causas, na obtenção de uma maior eficiência nesses processos, deve-se ao enorme grau de variação de composição dos resíduos urbanos, um maior conhecimento de tal composição e triagem, a qual elevaria muito seu aproveitamento energético [8].

Um dos principais resíduos orgânicos produzidos nos domicílios e estabelecimentos comerciais voltados para refeições é o óleo de cozinha usado, que a despeito de seu potencial poluidor para o solo e para a água, além da problemática do entupimento das canalizações de esgotos públicos a longo prazo [9], possui também uma inegável aptidão energética, que se bem aproveitada, pode contribuir em muito para a geração de um biodiesel eficiente e pouco agressivo ao Meio Ambiente.

A Lei Maior do nosso país, em seu artigo 225, *caput*, estabelece que todos têm direito ao Meio Ambiente ecologicamente equilibrado, impondo-se não só ao Poder Público, mas também à coletividade, o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações[9].

Portanto, há amparo jurídico para se defender a possibilidade - e mais do que isso a obrigação - de utilização do óleo de cozinha usado para fabricação de biodiesel.

Nessa esteira, não é ocioso lembrar que a Política Nacional de Resíduos Sólidos, elegeu a reciclagem como um de seus objetivos, abordando-a sob diversos aspectos, tais como incentivo à indústria de reciclagem, desenvolvimento de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de reciclagem e reciclagem como parte do Plano Estadual de Resíduos Sólidos [11].

Calha destacar, ainda, que o Governo do Estado de São Paulo instituiu o Programa Estadual de Tratamento e Reciclagem de Óleos e Gorduras de Origem Vegetal ou Animal e Uso Culinário [12].

Dentre outras finalidades para instituição do Programa, estão a proteção da rede de esgotos, a proteção dos mananciais, a educação ambiental e o fomento de atividades econômicas que realizem a reciclagem do óleo de uso culinário.

E para arrematar, o Município de Guarulhos também instituiu o Programa Municipal de Incentivo ao Tratamento e Reciclagem de Óleos e Gorduras de Origem Vegetal ou Animal e uso Culinário no Município de Guarulhos [13].

Assim, já existe um suficiente arcabouço jurídico para justificar reuso do óleo de cozinha usado como alternativa à produção de biodiesel.

II. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Produção do biodiesel: o óleo de cozinha foi caracterizado em relação ao seu índice de acidez previamente ao uso na reação. Feito isto a reação se deu na seguinte condição:

Uma porção de 0,5 g de NaOH foi adicionado à 25 mL de metanol sob agitação e aquecimento até 65 °C. Em outro recipiente, o óleo foi aquecido, sob agitação, até 65 °C e adicionamos o álcool com o catalisador previamente

dissolvido e aquecido (25 mL). A reação foi mantida pelo período de uma hora e o sistema foi resfriado. O volume total da reação foi posteriormente transferido para um funil de bromo e permaneceu em repouso por toda a noite. Ao final percebeu-se a formação de duas fases, a superior de coloração levemente amarelada e translúcida relativa ao biodiesel e outra clara e turva formada pela glicerina. O óleo diesel produzido passa por sucessivas lavagens com água destilada e posterior separação em funil de bromo. O co-produto glicerina pode ser utilizada em diversas aplicações sendo a mais comum a produção de sabonetes.

III. DISCUSSÃO

O presente trabalho mostra a conversão de um resíduo de grande impacto ambiental e urbano quando lançado diretamente na rede de esgoto. A reação e todo procedimento metodológico de conversão foi realizada por alunos de graduação do curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário ENIAC com pouco aprofundamento teórico em química mas que foram capazes de desenvolver sem grandes problemas todo processo. Além de todo o conhecimento adquirido pelos estudantes, o projeto também serviu para desenvolver o senso de sustentabilidade e reúso. A sustentabilidade não se restringe ao uso de óleo de cozinha usado como matéria prima, outros trabalhos também mostram o uso da gordura animal [14] e o catalisador pode ser substituído por conchas de caranguejo moídas [15].

Como comentado anteriormente, o processo não é produzido com relativa dificuldade uma vez que os parâmetros tenham sido bem estabelecidos, conforme efetuado pelos alunos. Isto também se comprova quando vemos iniciativas do reúso do óleo em comunidades mais afastadas [16]. Além destes benefícios, o biodiesel ainda promove a diminuição da emissão de poluentes e material particulado em relação ao biodiesel de petróleo [17].

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A legislação brasileira tem um papel de destaque na temática aqui abordada, uma vez que dispôs sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira [18].

A partir dela, estabeleceu-se um calendário, que cuidou do aumento progressivo do percentual de mistura do biodiesel ao diesel fóssil.

De fato, o incremento do biodiesel ao diesel fóssil, se iniciou em 2.008, com 2% do volume, pode chegar a 15% em 2.019 [19][20].

Deduz-se, assim, haver uma tendência na utilização e fomento de biocombustíveis.

V. AGRADECIMENTO

Agradecemos ao Centro Universitário ENIAC pelo apoio incondicional, financeiro e as bolsas de estudo custeadas pela instituição. A integração e possibilidade da interdisciplinaridade tornou este trabalho diferenciado com aspectos técnicos e legais, ambos essenciais para sua execução.

REFERÊNCIAS

- [1] IPCC, 2004, *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponível em www.ipcc.org.
- [2] IEA, 2011. *Key World Energy Statistics 2011*. Disponível em www.iea.org.
- [3] Mikael Höök, Tang Xu. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change – a review. *Energy Policy*. v. 52, January 2013, p. 797–809. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>
- [4] IEA, 2012. *World Energy Outlook 2012*. Disponível em www.iea.org.
- [5] Lima,J.R.O.; Silva,R.B.; Silva,C.C.M.; Santos,L.S.S.; Santos Jr,J.R.; Moura,E.M.; Moura,C.V.R. 2007. Biodiesel de babaçu (Orbignya sp.) obtido por via etanólica. *Quím. Nova* v.30 n.3.
- [6] Ribas,W.F.; Bilotta, P.; Janissek,P.R.; Carvalho Filho,M.A.S.; Neto,R.A.P. 2016. Influência do combustível (diesel e biodiesel) e das características da frota de veículos do transporte coletivo de Curitiba, Paraná, nas emissões de NOx. *EngSanit Ambient*. v.21 n.3 jul/set 2016 p.437-445.
- [7] Mineta national transit research consortium. “Experimental Modeling of NOx and PM Generation from Combustion of Various Biodiesel Blends for Urban Transport Buses”. Agosto 2016. The university of toledo.
- [8] Seltnerich N. Emerging Waste-to-Energy Technologies: Solid Waste Solution or Dead End? *Environ Health Perspect*. 2016 Jun 1;124(6):A106-11.
- [9] Husain IA, Alkhatib MF, Jammi MS, Mirghani ME, Bin Zainudin Z, Hoda A. Problems, control and treatment of fat, oil and grease (FOG): a review. *J Oleo Sci*. 2014;63(8):747-52. Epub 2014 Jul 8. Review.
- [10] BRASIL. Constituição Federal
- [11] BRASIL. Lei nº 12.305/10
- [12] SÃO PAULO. Lei nº 12.047/05
- [13] GUARULHOS. Lei nº 6.538/09
- [14] Tsanaktisidis,C.G.; Kiratzis,N.;Tzilantonis,G.T.; Sariannidis,N.S. Spithiropoulos,K.G. Variation of Density and Conductivity with mixtures of Diesel and Biodiesel (animal and vegetable) by analysis of variance using the linear regression and interpretation using mathematical equations. 2016. *5th Annual International Conference on Sustainable Energy and Environmental Sciences*.
- [15] Boey PL, Maniam GP, Hamid SA. Utilization of waste crab shell (Scylla serrata) as a catalyst in palm olein transesterification. *J Oleo Sci*. 2009;58(10):499-502
- [16] Moecke,E.H.S.; Werner,S.M.; Gelsleichter,Y.A.; Avila,A.F.A., Silveira,T.C. Produção de biodiesel a partir do óleo de fritura usado e o empoderamento da comunidade. *R. gest. sust. ambient.*, Florianópolis, v. 1, n.1, p. 33-40, abr./set. 2012.
- [17] Wei,L.; Cheung,C.S.; Ning,Z. Influence of waste cooking oil biodiesel on combustion, unregulated gaseous emissions and particulate emissions of a direct-injection diesel engine. 2017. *Energy* 127; p.:175-185.
- [18] BRASIL. Lei nº 11.097/05
- [19] BRASIL. Lei nº 13.033/14
- [20] BRASIL. Lei nº 13.263/16

GESTÃO DE RESÍDUOS NO BENEFÍCIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS: O CASO DAS MARMORARIAS

E. M. M. Samudio¹, F. F. M. Dourado², D. A. A. Bettiol³, B. M. Oliveira⁴

Y. I. A. Silva⁵, R. A. Reis⁶

Resumo - Com o constante aumento da preocupação sócio ambiental, os projetos de adequação dos processos de beneficiamento de rochas ornamentais e o manejo dos seus resíduos, se tornam cada vez mais importantes. O objetivo deste trabalho é identificar quais são as mudanças que devem ser implementadas na fábrica para minimizar a geração de resíduos e identificar as rotas tecnológicas mais apropriadas para seu tratamento. Trata-se de pesquisa exploratória e bibliográfica com estudo de caso de uma Marmoraria estabelecida na Região Metropolitana de São Paulo. A aplicação de medidas não estruturais (instrução de trabalhadores), mudanças físicas dos processos produtivos e sistemas de tratamento de resíduos permitem minimizar a geração de resíduos. Novos *modus operandis* e logísticos resultam numa melhor gestão permitindo a maximização dos impactos sociais positivos e a minimização dos impactos negativos sobre o meio ambiente. Constatou-se que a pouca conscientização ambiental e a baixa qualificação técnica da mão de obra utilizada são os fatores preponderantes no manejo incorreto dos resíduos produzidos. Observou-se que os métodos de coleta, segregação e tratamento dos resíduos são precários o que prejudica uma gestão adequada. Com relação aos resíduos líquidos o que se encontrou na prática foi o lançamento direto na rede pública de esgotos sanitários, com baixo ou nenhum tipo de tratamento. O tratamento se limitava a sedimentação e as vezes recirculação da água decantada, visando economizar água potável, para redução de custos. Os resíduos sólidos finos que se originam devido ao corte de peças brutas se misturam a água de resfriamento, contaminando-a, posteriormente se depositam por sedimentação no fundo de tanques que atuam como decantadores, formando uma lama. Outros resíduos sólidos de maior tamanho como retalhos, faixas e filetes são depositados atrás das máquinas formando montículos de rochas, com tamanhos variados, sendo removidos posteriormente, como entulho, por caçambeiros, para aterros denominados "bota fora".

Palavras-chave: Resíduos; Marmorarias; Reuso; Otimização.

Abstrac - With the constant increase of the socio-environmental concern, projects of adaptation of processes of ornamental stone processing and management of its residues, become increasingly important. The objective of this work is to identify the changes that must be implemented in the plant to minimize a waste generation and identify as technological routes more appropriate for its treatment. This is an exploratory and bibliographical research with a case study of a marble workshop established in the Metropolitan Region of São Paulo. The application of non-structural measures (training of workers), physical changes of production processes and waste treatment systems, minimize the generation of waste. New operational and logistical *modus operandis* resulting in better management, maximizing positive social impacts and minimizing negative impacts on the environment. It was found that the low environmental awareness and a low technical qualification of the used labor force are the predominant factors in the incorrect handling of the waste produced. It was observed that methods of collection, segregation and waste treatment are precarious, which impairs proper management. With respect to the liquid waste that is available in the practice for the direct launching in the public network of sanitary sewers, with low or the type of treatment. The treatment was limited to sedimentation and as sometimes the recirculation of the decanted water, aiming at saving potable water, to reduce costs. The fine solid residues that originate due to the cutting of raw materials mix the cooling water, contaminating it, and then deposited by bottom sedimentation of tanks that act as decanters, forming a mud. Other larger solid wastes such as scraps, slabs and files are deposited behind the machines forming mounds of rocks, with assorted rocks being removed as debris by barnacles to landfills called "for".

Key-Words. Waste; Marble works; Reuse; Optimization.

estabelecidos os processos mais adequados de tratamento da fase líquida gerada visando seu reuso e o estabelecimento do *modus operandis* e logístico de reciclagem dos resíduos sólidos produzidos.

I. INTRODUÇÃO

Como podem ser reaproveitados os resíduos líquidos, sólidos ou semi-sólidos gerados no processo beneficiamento de rochas ornamentais? Quais são as tecnologias disponíveis atualmente para adequar esses resíduos ao reuso? Como se deve instruir a mão de obra para conscientizá-la da importância da redução da geração de resíduos? Estas são as principais questões que serão respondidas ao longo deste texto. Inicialmente será realizada uma pesquisa exploratória, associada a pesquisa bibliográfica e estudo de um caso.

O estudo deste assunto foi motivado pela necessidade de redução dos resíduos produzidos pelas marmorarias de beneficiamento de rochas ornamentais, em consonância com as imposições da Lei No 12.305 de Agosto de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos em seu artigo 13, alínea h.

Os resíduos gerados nos processos produtivos das marmorarias podem e devem ser encaminhados para outros processos produtivos ou reutilizados pela própria fábrica. Para tanto deve-se orientar e instruir os trabalhadores sobre a origem e valor econômico da matéria prima, e sobre a trajetória seguida desde sua extração (verso), sua logística (transporte), sua transformação (processos), sua distribuição (consumo) e os impactos sócio ambientais e econômicos envolvidos até o fim do uso (túmulo). Dessa forma se promoverá um crescimento da preocupação ambiental e consequente mudanças significativas de comportamento entre os atores envolvidos garantindo o tal desejado desenvolvimento sustentável.

Em relação ao tratamento dos resíduos líquidos pode-se afirmar que atualmente existem tecnologias apropriadas para tal propósito o que garante seu reuso ou seu lançamento na rede pública de esgoto sanitário ou nos corpos receptores, com características físico-químicas dentro dos limites estabelecidos pela legislação ambiental.

Por outro lado, os resíduos sólidos gerados podem ser encaminhados a outros processos produtivos e assim constituir-se em matéria prima, como por exemplo agregados para fabricação de concreto, componentes de argamassas, constituintes de pavimentos asfálticos, constituintes de tijolos e de peças cerâmicas.

Espera-se que surja uma nova consciência ambiental entre empresários e trabalhadores do setor, onde prevaleçam a não geração, a minimização e/ou reuso dos resíduos produzidos.

O objetivo deste trabalho é adequar o processo de beneficiamento de rochas ornamentais para maximizar os impactos positivos sócio - ambientais e minimizar os impactos negativos sobre o meio ambiente. Para tanto serão

II. DESENVOLVIMENTO

A. CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO.

Será utilizada a palavra "marmoraria", para definir uma oficina onde são produzidas peças usadas na construção civil, através do beneficiamento de rochas (mármore e granito); portanto, trata-se de um processo de transformação de rochas brutas em peças ornamentais. No início do processo, recebem-se chapas de rochas em estado bruto que são transformadas, através do aparelhamento, em peças acabadas, para a indústria da construção civil. As matérias primas da atividade de beneficiamento de rochas, objeto deste estudo são chapas de mármore, granito e quartzo. A produção média anual é: 27 toneladas de revestimentos (ladrilhos, pisos e azulejos de mármore, de granito e areia fina, soleiras, rodapés) e 27 toneladas de peças especiais (placas para balcões, bancadas de pia, bancadas de lavatórios, mesas e colunas). As máquinas utilizadas são uma serra com trilho de 6 metros de comprimento e potência de 15 cv, um compressor parafuso para a rede pneumática com potência de 15 cv, uma furadeira de bancada com potência de 2 cv, três mesas de acabamento e uma caixa de água para reuso de 1.500 litros de capacidade.

A marmoraria opera atualmente, obedecendo a portaria Nº 43 do Ministério do Trabalho e Emprego (2008) que proíbe o trabalho a seco e a utilização de máquinas adaptadas que não tenham sido projetadas especificamente para o trabalho a úmido.

No processo de corte e aparelhamento de chapas, as serras que cortam ou desbastam as chapas têm a lâmina lubrificada por água, a fim de manter íntegros tanto o material serrado quanto o disco de corte.

No processo de montagem e acabamento das peças, estas são desbastadas e polidas com a utilização de equipamentos pneumáticos, já citado, também refrigerado por água.

Durante os processos de transformação da matéria prima são gerados esgotos industriais e resíduos sólidos. Este trabalho foi limitado apenas ao estudo dos esgotos (efluentes líquidos) e aos resíduos sólidos produzidos.

B. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.

As informações utilizadas para caracterizar o processo e os resíduos estudados foram obtidas através de levantamento de campo e entrevistas com funcionários.

Outros dados foram obtidos caracterizando e classificando os efluentes e resíduos sólidos, segundo as Normas NBR 13402:1995 - Caracterização de cargas poluidoras em efluentes líquidos industriais e domésticos e NBR 10004:2004 - Resíduos sólidos - Classificação, respectivamente da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

De acordo com a norma NBR 13402:1995,

A carga poluidora origina-se do não aproveitamento integral dos materiais ou substâncias envolvidas em processos de transformação e utilidade, resultando o lançamento de resíduos em corpos receptores.

No caso em estudo, foram identificadas como substâncias sem reaproveitamento integral a água potável e restos de mármore, granito e quartzo, gerando resíduos líquidos e sólidos. A fonte de abastecimento de água é a rede pública que fornece diariamente, em média 0,86 m³ de água potável, dos quais 0,30 m³ são para uso doméstico e 0,56m³ para uso industrial. Como resultado do uso dessa água são gerados diariamente aproximadamente 0,30m³ de esgotos domésticos (sanitários e cozinha) e 0,56m³ de esgotos industriais (corte de peças e limpeza geral).

Os esgotos industriais são constituídos de um composto de água e rochas solubilizadas, que ao serem decantados produzem um resíduo semi-sólido denominado lodo ou lama, com aparência física pastosa.

Como resíduos intermediários podem-se citar as partículas oriundas das ferramentas, produzidas pela abrasão das pastilhas do disco de corte e partículas oriundas do desbaste e polimento de peças, que apesar de inexpressivos em volume, escoam com os efluentes líquidos, contaminando-os. Outro resíduo produzido é a areia utilizada como facilitador de movimentação entre a chapa e a mesa de corte.

De acordo com NBR 10004:2004,

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com a listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

A mesma norma define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólidos e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstico, hospitalar, comercial e agrícola, serviços de varrição. Ficam incluídos nessa definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Sendo assim, os resíduos sólidos da marmoraria, são classificados como não perigosos, sob o código A011 (resíduos minerais não metálicos) do Anexo H da instrução normativa citada, caracterizado pelo conhecimento do resíduo, não constante dos anexos A ou B da referida norma, isento de características de inflamabilidade, corrosividade, radioatividade, toxidade ou patogenicidade, cujas concentrações de solubilidade devem ser tratadas.

Para caracterizar os resíduos sólidos oriundos deste processo industrial utilizou-se o método indireto por comparação dos processos produtivos. Assim foi possível fazer uma primeira caracterização utilizando resultados obtidos por outros pesquisadores. As marmorarias são equipadas com discos diamantados de corte que exigem em seu funcionamento o resfriamento através de água. Assim, são gerados resíduos líquidos contendo altas concentrações de sólidos solubilizados, que se lançadas em corpos de água superficiais, impactam negativamente sua cor, turbidez, dureza e sabor (MORAES,2006).

Segundo Moraes (2016, Pag. 11)no processo de solubilização dos resíduos sólidos oriundos de marmorarias, seguindo os critérios e procedimentos descritos pela NBR 10007 e NBR 10006, salvo as contaminações já descritas quanto a cor, turbidez, dureza e sabor, nenhum outro de seus constituintes solubilizados apresentou concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Diante do exposto podem-se classificar os resíduos produzidos como sendo:

Resíduos líquidos:

- Esgotos Domésticos.
- Esgotos industriais (água contaminada).

Resíduos sólidos:

- Lodo ou lama (espécie de pasta);
- Retalhos e pedaços de chapas;
- Filetes e faixas de corte (menores que 2 cm);
- Detritos de formatos e dimensões diversas.

C. LEVANTAMENTO DOS PROBLEMAS E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES

Com base nas análises das informações obtidas na literatura técnica e nas observações de campo procedeu-se a formulação da solução dos problemas. O primeiro passo no encaminhamento da água, já consideradas as condições adequadas de alimentação do sistema, foi conduzi-la adequadamente aos processos de corte, montagem e acabamento. No processo de corte, a água, após seu uso na serra, escoou pela superfície dos materiais cortados e pelos equipamentos, percorrendo consequentemente duas direções, conforme mostra a figura 1.

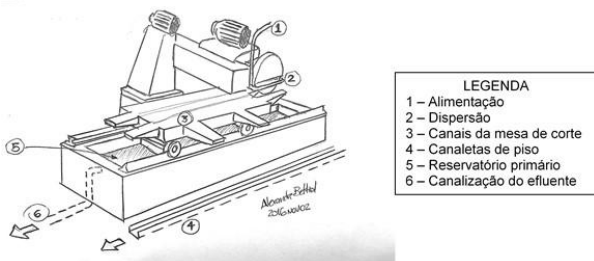


Figura 1 – Esquema do fluxo da água no corte
Autor: BETTIOL (2016).

O fluxo da água utilizada no processo pode ser descrito da seguinte forma: primeiramente permeia-se o corte, que escoou sobre a chapa, caindo por gravidade, através dos orifícios e frestas próprias da mesa de corte, até chegar ao primeiro tanque onde ocorre a sedimentação e decantação. Ou seja, neste primeiro reservatório, situado abaixo da mesa de corte, se gera um efluente constituído de partículas (restos de matéria prima) e água utilizada no processo.

Nos setores de acabamento e montagem, a segunda direção percorrida pela água no processo de corte, ocorre pela queda da água no piso da oficina, conforme ilustrado na figura 2. Observa-se que é necessária a implantação de um sistema de coleta e drenagem de efluentes sob o piso, devidamente equipadas com tampas, permitindo um tráfego seguro dos trabalhadores.

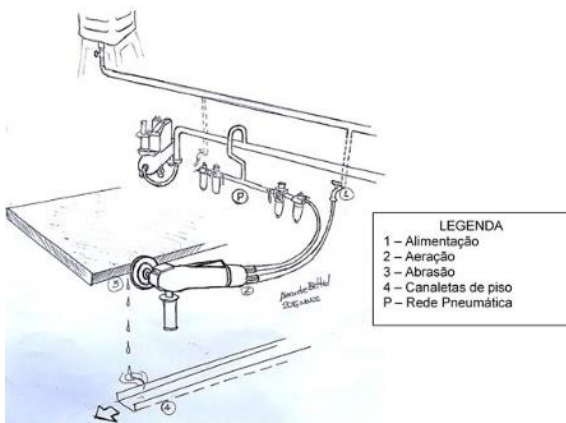


Figura 2 – Fluxo da água na montagem e acabamento
Autor: BETTIOL (2016).

Numa segunda etapa do processo o esgoto industrial é conduzido por condutos abertos ou tubulações até a caixa retentora, adaptada para este fim da Norma Técnica NTS 217 - Ligação Predial de Esgoto (2015) conforme apresentada na figura 3.

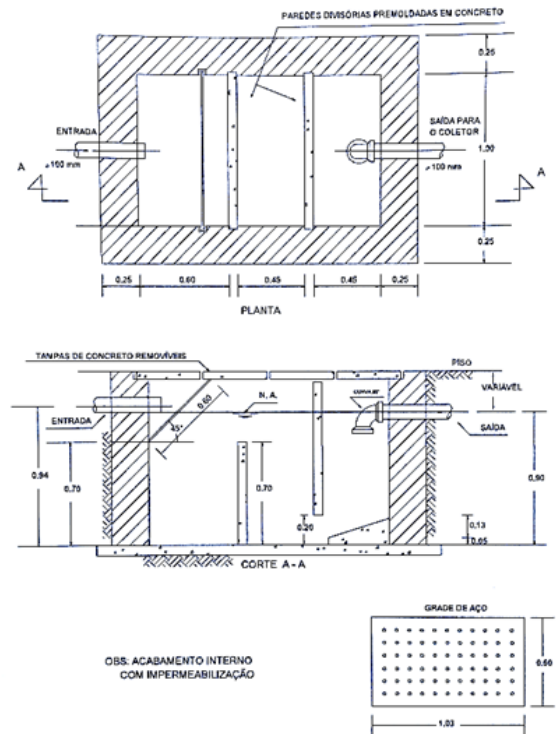


Figura 3 – Caixa Retentora
Fonte: Adaptado de SABESP (2015).

Nesta etapa do processo, assim como no primeiro tanque, só que de uma forma menos turbulenta, ocorre uma adicional sedimentação das partículas e decantação do líquido, produzindo um lodo em forma de lama de rocha, cujas partículas são de granulometria muito reduzida.

A primeira medida foi transformar os esgotos industriais ao estado equivalente de esgoto sanitário para posteriormente lança-lo a rede pública de esgotamento sanitário.

Após esse tratamento, o efluente já apresenta características satisfatórias para o lançamento na rede de esgotamento sanitário, porém observou-se que além de cumprir com as exigências da legislação ambiental apresentava-se boa qualidade, o que significou uma oportunidade de reduzir os custos de consumo de água, através do reuso desse efluente tratado.

D. REUSO DOS EFLUENTES.

Para melhorar a qualidade desse efluente visando seu reuso, torna-se necessário, como já citado, prestar atenção em relação alguns parâmetros tais como:

Cor e Turbidez – A turbidez da água decorrente das partículas produzidas pela brasão durante o beneficiamento, determinam a coloração característica do efluente.

Dureza – A dureza da água se refere à presença de cálcio e magnésio dissolvidos; quanto mais cálcio e magnésio tiver mais dura à água será.

Sabor – A presença das partículas suspensas, bem como a presença de determinados sais minerais são os responsáveis pela alteração da insipidez da água.

Levando em consideração os parâmetros descritos acima, o processo do tratamento das águas residuárias das marmorarias devem consistir na precipitação e eliminação das partículas que lhe conferem cor, turbidez, dureza e sabor. Isso pode ser feito através de várias técnicas, por exemplo, utilizando-se processos físicos (sedimentação e decantação) complementados por processos químicos, com aplicação de coagulantes (sulfato de alumínio, cloreto férrico ou sulfato ferroso) e floculantes (polímeros).

E quando ainda persistem parâmetros fora dos limites estabelecidos, como pH alcalino, pode-se recorrer a processos simplificados de tratamento, como:

Coagulação – Adicionar ao efluente coagulantes do tipo sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato ferroso, etc., corrigir o pH com soda ou cal e a seguir aplicar agitação rápida para provocar a desestabilização elétrica das partículas poluidoras, facilitando sua agregação.

Floculação - a água recebe polímeros, aglutinando impurezas e formando flocos, facilitando a remoção.

Decantação – sendo mais pesados que a água, os flocos se depositam no fundo, formando um lodo.

Filtração – camadas filtrantes retêm os flocos menores ainda em suspensão.

As quatro etapas: coagulação, floculação, decantação e filtração recebem a denominação de clarificação. Nesta fase, todas as partículas de impurezas são removidas deixando a água límpida. Mas ainda não chega a ser segura para contato físico com os funcionários. Torna-se necessária uma quinta etapa que é a desinfecção, com o uso de cloro (por exemplo hipoclorito de sódio), que permite a eliminação de microrganismos patogênicos.

Após a sedimentação e decantação é possível utilizar um processo de filtração lenta, que apresenta algumas vantagens como: não necessita de produtos químicos, baixo custo de construção, operação e manutenção, não necessita de mão de obra qualificada, produz água menos corrosiva e é um dos processos de tratamento de água que produz menos lodo. Esses filtros podem ser de fluxo ascendente ou descendente.

Os principais fatores que limitam o bom funcionamento dessas unidades de tratamento são mudanças bruscas de vazão, elevada turbidez e falta de limpeza periódica. Para facilitar a limpeza tem sido utilizado membranas do tipo tecido não tecido.

E. RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo Formigoni (2006) apud Santos et. al., (2012) estima-se que durante o processo de corte sejam perdidos de 25% à 30% da matéria prima, uma vez que é transformada em pó e retalhos. Os resíduos de mármore e granito são materiais de grande resistência que podem ser reutilizados na construção civil para fabricação de argamassa, lajotas, brita e corpos cerâmicos.

Os principais resíduos sólidos gerados no processo de fabricação de peças ornamentais são:

- Lama de mármore e granitos;
- Filetes, faixas e retalhos;
- Resíduos finos.

Esses resíduos podem ser reutilizados das seguintes formas:

- Incorporação da lama de mármore e granito em massas argilosas: de acordo com os resultados de um estudo feito por Silva et al. (2005) é possível adicionar resíduos sólidos a massas argilosas sem prejudicar a qualidade e propriedades do produto final.
- Uso de finos em substituição às areias naturais na elaboração de argamassa: segundo D'Agostino e Soares (2003) a areia resultante da britagem de rocha (os finos), mostrou-se um material adequado para o preparo de argamassas.
- Uso de finos como substituição de partes do cimento em argamassa de revestimento: Estácio (2015) concluiu que é possível usar até 2,5% de finos na fabricação de argamassa para revestimento.
- Uso de finos em misturas de solo-cimento para correção granulométrica de um solo argiloso: segundo ensaios realizados por Pissato e Soares (2006) a adição de finos ao composto solo-cimento é uma alternativa viável, levando a um aumento proporcional da resistência da mistura final.
- Utilização do resíduo do beneficiamento de mármore e granito no concreto auto adensável: estudo realizado por Carvalho e Araújo (2013) mostrou que o uso desses resíduos não trouxe nenhum prejuízo para as propriedades do concreto auto adensável, apresentando alta capacidade de fluidez e de preenchimento das formas.
- Resíduo de granito na fabricação de cimento portland: Borges (2001) concluiu que a mistura do granito com escória de aciaria pode ser utilizada na fabricação do cimento portland.
- Resíduo de corte de mármore e granito para produção de lajotas: Segundo Bauer (2008) é

possível a utilização dos resíduos de mármore e granito na fabricação de lajotas, substituindo parte do agregado miúdo.

- Resíduo de britagem de granito como substituição de agregado natural: “95% dos agregados para concreto britado usados no Brasil são de origem granítica, basáltica ou calcária” (SBRIGHI, 2012).

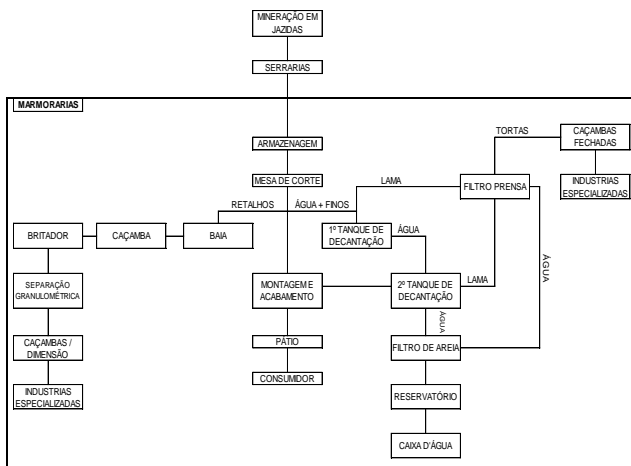
Durante o processo de corte e polimento das chapas é gerado uma lama abrasiva decorrente da mistura de água com o pó de mármore e granito, essa lama é jogada em um tanque de decantação e deverá ser desidratada por meio de filtro prensa e a torta resultante pode ser reutilizada.

Os filetes, faixas e retalhos de maior volume deverão ser depositados em caçambas, e daí levados para moagem e classificação granulométrica. O pó de pedra e areia de brita também são considerados subprodutos finos.

Após a separação granulométrica os resíduos são colocados em caçambas para posteriormente serem destinados para empresas que utilizam esses produtos como matéria prima.

F. ADEQUAÇÃO DE PROCEDIMENTOS

Observa-se que no setor de beneficiamento de rochas são utilizados procedimentos rudimentares, a maioria, empíricos e com pouca ou nenhuma normatização. Também se evidencia a falta de programas de controle do uso da matéria prima e produtos auxiliares, como a água.



O uso de normas vem sendo impulsionado principalmente pelas imposições do mercado, pelas políticas nacionais de gestão de resíduos e pela legislação ambiental.

Visando orientar o setor de marmorarias no uso adequado de seus processos produtivos e na gestão dos resíduos propõe-se o modelo apresentado na figura 4. Este modelo permite o uso racional da matéria prima e dos resíduos produzidos.

Figura 4. Modelo de gestão proposto
Autor: BETTIOL (2016).

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A falta de conhecimento técnico e econômico tanto da matéria prima quanto das tecnologias de tratamento de resíduos são causas preponderante na geração de resíduos líquidos e sólidos no setor de beneficiamento de rochas ornamentais. Conseqüentemente, a matéria prima e os produtos auxiliares são utilizados de forma ineficiente e ineficaz, gerando resíduos, com isso, provocando sérios problemas econômicos, sociais e ambientais.

A elaboração de estudos e projetos que levem em consideração as normas técnicas, critérios de engenharia e boas práticas profissionais devem ser o primeiro passo para a implantação de fábricas de beneficiamento de rochas.

O empresário ou gestor da fábrica deve focar na não geração, na minimização, na reutilização e como última medida o tratamento e disposição final.

Ficou demonstrado que o adequado tratamento dos esgotos industriais viabiliza o reuso, minimizando o uso de água potável e reduzindo os custos.

O direcionamento dos resíduos sólidos e semissólidos produzidos para empresas que reciclam resíduos da construção civil, vai de encontro às políticas nacionais de gestão de resíduos sólidos.

O estabelecimento de práticas e processos normatizados favorecerá o aperfeiçoamento das técnicas atualmente em uso.

Um sistema de tratamento de esgotos industriais gerados em marmorarias, baseado em processos físico-químico do tipo decantação e sedimentação primária, coagulação e floculação, seguido de decantação e sedimentação secundária, com filtração lenta e desinfecção, nos permite o seu reuso com garantia da qualidade adequada.

Para uma melhor gestão dos resíduos no setor de marmoraria deve-se enfatizar o tratamento e reuso dos esgotos industriais e encaminhamento dos resíduos sólidos para outros processos produtivos destacadamente a indústria de reciclagem de resíduos da construção civil.

Atualmente existem tecnologias para tratamento das águas residuárias, oriundas dos processos produtivos, em qualquer estado de contaminação. Porém, o grau de tratamento dependerá do uso a ser dado à água, o que repercutirá nos custos.

Os resíduos sólidos gerados neste setor industrial podem ser reciclados, quase que de forma integral, se direcionados às empresas que produzem materiais, agregados, para a indústria da construção civil.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] _____.NBR 10004:2004 – **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- [2] _____.NBR 10006:2004 – **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- [3] _____.NBR 10007:2004 – **Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- [4] _____.NBR 13402:1995 - **Caracterização de cargas poluidoras em efluentes líquidos industriais e domésticos**. Rio de Janeiro, ABNT, 1995.
- [5] _____.NTS 217.**Ligação Predial de Esgoto**. SABESP, São Paulo – Revisão 2 – Agosto, 2015.
- [6] BORGES, A. **Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduo do Beneficiamento de Granito e Escória de Aciaria LD na Fabricação de Cimento Portland**. Espírito Santo, 201-. Disponível em <http://biblio.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/565/Adriano_Borges.pdf?sequence=1>. Acesso em 06 nov. 2016.
- [7] CARVALHO, R. e ARAÚJO, E. C.**Utilização do resíduo do beneficiamento de mármore e granito no concreto auto-adensável**. Minas Gerais, 2013. Disponível em <<http://www.unilesteng.br/pic/sic-14/resumos/pesquisa-engenharia-tecnologia/UTILIZACAO-DO-RESIDUO-DO-BENEFICIAMENTO-DE-MARMORE-E-GRANITO-NO-CONCRETO-AUTO-ADENSAVEL.pdf>>. Acesso em 06 nov. 2016.
- [8] D'AGOSTINO, L. e SOARES, L.**O uso de finos de pedra de rocha granítico-gnáissica em substituição às areias naturais na elaboração de argamassa**. Revista Geociências, São Paulo, 2003. Disponível em <http://www.revistageociencias.com.br/22_1/6.PDF>. Acesso em: 06 nov. 2016.
- [9] ESTÁCIO, M. C. **Utilização de finos de pedra com substituição de partes do cimento em argamassa de revestimento**. Maringá, 2015. Disponível em <<http://www.eaic.uem.br/eaic2015/anais/artigos/80.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2016.
- [10] MORAES, I. **Mármore e Granito: Lavra, Beneficiamento e Tratamento de Resíduos**. Dossiê Técnico, SBRT – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, 2006. Disponível em <http://biton.uspnet.usp.br/cirra/wp-content/uploads/2013/09/IHMZpaper.ABES_.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2016.
- [11] PAULA, M. **Corte, pedra, cantaria arte com pedra**. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=fOAa899M5ZU>>. Acesso em: 03 set. 2016.
- [12] SANTOS et al. **Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito**. REGET/UFMS, 2012. Disponível em

<<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/7238/pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2016.

- [13] SILVA et al. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em 05 nov. 2016.
- [14] SPÍNOLA, V.; GUERREIRO, L.; BAZAN, R. **A indústria de rochas ornamentais**. Desenhahia: Bahia, BA, 2004. Disponível em <http://www.desenhahia.ba.gov.br/recursos/news/video/%7B3FC152B1-BEAA-4ED5-B748-C370C1559F4B%7D_Rochas_ornamentarias.prn.pdf>. Acesso em: 03 set. 2016.
- [15] VILELA, R; BARRETO, J.**Proíbe o processo de corte e acabamento a seco de rochas ornamentais e altera a redação do anexo 12 da Norma Regulamentadora nº 15**. Disponível em <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=205694>>. Acesso em: 05 nov. 2016.
- [16] MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO SECRETARIA DE INSPEÇÃO DO TRABALHO. PORTARIA N.º43, DE 11 DE MARÇO DE 2008 (*) (DOU de 13/03/08) “**Proíbe o processo de corte e acabamento a seco de rochas ornamentais e altera a redação do anexo 12 da Norma Regulamentadora n.º 15**”
- [17] PISSATO, E. e SOARES, L. **Utilização de finos de pedra em misturas de solo-cimento: Correção granulométrica de um solo argiloso**. Exacta, São Paulo, 2006. Disponível em <http://exactaep.com/index.php/exacta/article/viewFile/667/624>. Acesso em:06 nov. 2016.
- [18] **Estudo da utilização de resíduos de corte de mármore e granitos para produção de lajotas**. 15º Concurso Falcão Bauer, 2008. Disponível em <http://www.cbic.org.br/premioinovacaoesustentabilidade/baixar2.php?file=ESTUDO%20DA%20UTILIZA%C3%87%83%20DE%20RES%20C3%84%20DUO%20DE%20CORTE%20DE%20M%C3%81RMOR%20ES%20E.pdf>>.
- [19] SBRIGHI, _____. 2012. Disponível em <http://www.cimentoitambe.com.br/para-cada-tipo-de-concreto-um-tipo-de-brita/>. Acesso em: Nov. 2016.

V. SOBRE OS AUTORES

¹Doutor e Mestre em Engenharia Civil pela EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Engenheiro Civil pela UTP – Universidad Tecnológica de Panamá. Professor Doutor, do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário ENIAC e Professor Titular do Curso de Engenharia Civil da UNIAN - Universidade Anhanguera de São Paulo. E-mail: edgar.manuel@eniac.edu.br.

²Mestre em Engenharia Civil e Engenheiro Químico pela EPUSP.
³Empresário no segmento de marmoraria e Aluno de Engenharia Civil da UNIAN.

⁴Engenheiro Civil pela UNIAN.

⁵Engenheiro Civil pela UNIAN.

⁶Mestre em Engenharia Espacial – Mecânica, Professor do curso de engenharia civil do Centro universitário Eniac, E-mail: roberto.augusto@eniac.edu.br

ESTUDO PRELIMINAR DE REFORÇO DE MATERIAL POLIMÉRICO POR MEIO DE FIBRAS DE CARBONO

PRELIMINARY REINFORCEMENT STUDY OF POLYMERIC MATERIAL BY CARBON FIBERS

J. E. S. Lima¹, T. A. A. Assumpção², E. A. Azeredo, T. L. Macedo³, W. J. Masola⁴

Resumo: A fibra de carbono vem sendo aplicada como reforço de resinas e materiais poliméricos, resultando em compósitos de alto desempenho com a redução de peso, flexibilidade e resistência mecânica e a corrosão, necessárias a aplicações em diversos segmentos da indústria aeronáutica, automobilística, construção civil e metalúrgica em geral. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo preliminar na área dos compósitos, mais especificamente sobre resina epóxi (DGEBA) reforçada com fibra de carbono, para a verificação de uma possível substituição do mesmo com o uso de cabos de aço em elevadores para grandes edifícios. Utilizando-se um molde de acrílico, em laboratório, foram confeccionados corpos de prova, de compósitos com epóxi (DGEBA) e tecido de fibra de carbono com 2, 3, 4 e 5 camadas de reforço, bem como de epóxi puro, realizando ensaios de tração segundo a norma ASTM D3039, elaborando o comparativo de tensão de ruptura e deformação entre os materiais em questão e comparando as propriedades mecânicas. Nos dados obtidos foram observados que a interferência da quantidade de camadas do reforço de fibra carbono é o ganho notável resistência mecânica da resina, mantendo a densidade do compósito próxima da resina pura. **Palavras-chave:** Compósitos. Reforço. Fibra de Carbono. Resina Epóxi. Cabo de aço.

Abstract: Carbon fiber has been applied as a reinforcement of resins and polymeric materials, resulting in high performance composites with weight reduction, flexibility and mechanical strength and corrosion, required for applications in various segments of the aeronautics industry, automotive, civil construction and Metallurgical industry in general. Thus, this work has the objective of developing a preliminary study in composites materials, more specifically on epoxy resin (DGEBA) reinforced with carbon fiber, for the verification of a possible replacement of the same with the use of steel cables in elevators for large Buildings. Using an acrylic mold, in the

laboratory, specimens of epoxy composites (DGEBA) and carbon fiber fabric with 2, 3, 4 and 5 layers of reinforcement were made, as well as of pure epoxy, carrying out tests of tensile strength according to ASTM D3039, comparing tensile strength and deformation between the materials in question and comparing the mechanical properties. In the data obtained it was observed that the interference of the amount of carbon fiber reinforcement layers is the remarkable gain of mechanical strength of the resin, keeping the density of the composite close to the pure resin.

Keywords: Composite; Reinforcement; Carbon fiber; Epoxy resin; Steel cable.

I. INTRODUÇÃO

O intuito do trabalho em questão é desenvolver um estudo de reforço de material polimérico por meio de fibras de carbono para verificação das mudanças nas propriedades mecânicas. A união de materiais com naturezas diferentes, tais como, cerâmicos, poliméricos e metálicos, configura a formação de materiais que são chamados de compósitos, formados por uma matriz (material em maior quantidade) que por sua vez contém outros que não se misturam e com características diferentes (material em menor quantidade funcionando como reforço, por exemplo), que neste caso foram as fibras, com a finalidade de promover mudanças nas propriedades, principalmente as mecânicas no estudo em questão (CALLISTER, 2008).

A utilização das fibras para reforço tem sido uma das áreas mais pesquisadas pelos cientistas na busca por novas propriedades, assim como na possibilidade de utilização dos compósitos baseados em fibras em áreas que não se imaginava no passado, mas que hoje apresentam características muito superiores ao material puro. As áreas de aplicação são as mais diversas, desde as mais simples às mais avançadas, tais como reforços na construção civil de arcos para pontes de concreto (MALNATI, 2009) e nos reforços de vigas de concreto armado (BRENA, 2003), indústria aeroespacial (ZANATTA, 2012), para área militar como na blindagem balística nos coletes (SILVA, 2014), na indústria automobilística como no uso de envelopamento do carro (REZAEI, 2006), em entre outras. De forma geral o reforço com fibra tem como finalidade fornecer maior resistência mecânica ao material hospedeiro (matriz), além de outras vantagens como redução de peso, custo, isolamento ou ainda provocar mudanças nas propriedades

¹Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, São Paulo, Brasil, E-mail: jose.salgueiro@eniac.edu.br

²Doutor em Ciências, Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, São Paulo, Brasil, E-mail: thiago.alexandre@eniac.edu.br

³Alunos de graduação em Engenharia Mecatrônica, Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, São Paulo

⁴Mestrado em Matemática aplicada - Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, São Paulo, Brasil, E-mail: Wilson.jesus@eniac.edu.br

elétricas, magnéticas e ópticas (CALLISTER, 2006).

Atualmente o uso de cabos de aço nos elevadores em arranha-céus tem se tornado um problema com relação ao seu peso, pois quanto maior a altura do prédio maior a quantidade de cabos a serem utilizados implicando num maior peso de elevação, gerando maior esforço do motor, ou seja, além de elevar a cabine, também tem que dispendir potência para elevar o peso dos cabos considerados um peso morto. Neste caso existe a possibilidade de substituí-los, por compósitos de fibra-polímero diminuindo drasticamente o peso e possibilitando edifícios mais altos que os atuais, pois é possível obter características mecânicas parecidas e/ou superiores ao cabo de aço com a combinação de dois compostos, no caso o polímero e a fibra (reforço).

Com a realização dos ensaios de tração uniaxial tem-se por objetivo analisar os reforços aos materiais poliméricos e compará-los com usos como o de cabos de aço por exemplo, com a pretensão de substituí-los, totalmente ou parcialmente, em algumas aplicações, no caso dos elevadores, conforme os esforços do motor para realizar a movimentação do elevador carregado, a corrente aumenta, elevando o consumo de energia, assim o compósito fibra-resina, sendo mais leve, acarretaria na redução de peso e conseqüentemente uma diminuição de consumo com gastos de energia (CIF, 2014).

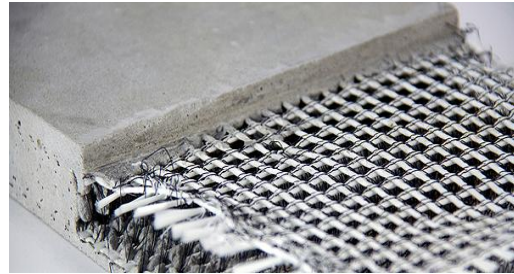
Através das pesquisas bibliográficas e os ensaios de tração uniaxiais, obtém-se uma análise crítica, preliminar para o uso e aplicações possíveis dos compósitos de polímeros reforçados com fibra, na substituição dos cabos de aço. Entender e demonstrar as diversas aplicações de reforços poliméricos contribui na criatividade do uso de diversos compósitos em diversas áreas, ampliando a aplicação dos mesmos na obtenção de materiais mais leves e resistentes a impacto e temperatura, que ajudam acrescentando o conceito, definições e ferramentas para que se possa atender as necessidades do mercado e da sociedade, na resolução de problemas de engenharias, como no caso de cabos de aço de elevadores ou mesmo na construção civil.

A. Referencial teórico

São chamados de compósitos a combinação de dois ou mais materiais insolúveis. Sua composição é constituída em várias fases, o que o torna um material multifásico, entretanto a maioria dos compósitos que existem apresentam somente duas fases, que apresentam características de ambas as fases que o compõe, buscando assim uma melhor combinação de propriedades, o que geralmente se obtém artificialmente. As duas fases que geralmente compõem os compósitos são a matriz, que pode ser polimérica, metálica ou cerâmica e a fase de reforço, que pode ser constituída de fibras longas ou curtas em fios, mantas e tecidos, sendo que o envolvimento da matriz no reforço é a cerne da estrutura do compósito (CALLISTER, 2006). Na Figura 1, observa-se um compósito formado por

uma matriz cerâmica, que neste caso é o concreto, e o reforço de fibra de carbono, fortalecendo assim o elemento estrutural.

Figura 1 – Concreto têxtil- concreto reforçado com fibra têxtil.

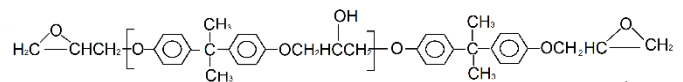


Fonte: SANTOS (2015).

A matriz polimérica é a fase contínua que envolve a outra fase. Geralmente são usadas resinas para a fabricação de compósitos poliméricos, sendo elas de dois tipos: termoplásticas e termorrígidas. As termoplásticas são mais limitadas pois quando imposta a altas temperaturas elas amolecem e/ou fundem devido o coeficiente de dilatação ser negativo, por se tratar de ligação não reticulada. No caso das termorrígidas, elas são estáveis as altas temperaturas devido a formação de ligações cruzadas no processo de cura, o que torna a formação do material irreversível (CALLISTER, 2002)

Uma das resinas mais utilizadas em compósitos reforçados com fibras, é resina epóxi, basicamente a palavra epóxi origina da junção de dois termos (*ep* do grego de entre ou sobre e *oxi* do inglês oxigênio) que literalmente significa oxigênio entre carbonos que em termos gerais temos a ligação de um átomo de oxigênio com dois átomos de carbono (SILAEX, 2015), sendo um material do tipo termorrígido obtido a partir de um sistema líquido contendo um reagente de cura para formar um polímero sólido insolúvel e infusível em temperatura ambiente. Entre as resinas epóxi mais utilizada encontra-se a diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA), cuja a estrutura pode ser observada na Figura 2.

Figura 2: Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA)



Fonte: ELLIS (1993)

Segundo PARDINI (2016), os maiores produtores mundiais de resinas epóxi atualmente são a Shell, a Dow Química e a Huntsman e respondem por aproximadamente 70% da produção mundial.

Normalmente são utilizados, para o processo de fabricação e modificação das características da resina polimérica, agentes que são incluídos na sua formação, tais

como aceleradores, diluentes solventes, plastificantes.

Segundo McAdams (1998), as resinas epóxi são muito versáteis e isso se deve a sua capacidade de reagir com vários tipos de substrato. Algumas das propriedades mais relevantes da resina epóxi são:

- ✓ Rápido processo de cura;
- ✓ Alta dureza;
- ✓ Baixa contração;
- ✓ Baixa exotermia;
- ✓ Boa resistência mecânica, entre outras.

Tais características resultam num leque de finalidades de acordo com o ambiente que o compósito será exposto, ou seja, podendo atuar em diversas áreas como medicina, aeroespacial (WILLIAMS; TRASK; BOND, 2007), eletrônicos, alvenarias, entre outras, e principalmente na área de ortodontia (ALBUQUERQUE, 1998).

Segundo o fabricante Zoltek (2017), a principal matéria-prima das fibras de carbono (Figura 3) é o polímero de poliacrilonitrila — um material obtido a partir da polimerização de uma variação do acrílico. A vantagem dessa fonte é a alta concentração de carbono, uma vez que mais de 90% dos átomos no material são justamente disso. Durante a produção, o polímero é esticado e se torna paralelo ao eixo das fibras, formando uma liga bem rígida e resistente.

Figura 3—Tecido de fibra de carbono.



Fonte: REDELEASE (2017).

Por ser um material sintético é bastante utilizada em aeronaves, acessórios esportivos, painéis de carros, bicicletas entre outros, para reforçar suas estruturas com leveza e resistência termomecânica. (ZOLTEK, 2017).

B. Procedimentos metodológicos

Neste trabalho, as informações relacionadas ao processo de fabricação de materiais compósitos foram obtidas a partir de levantamento bibliográfico com base em trabalhos encontrados em revistas científicas especializadas. De posse dessas informações, determinou-se que seria usada a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) segundo a qual é uma organização de desenvolvimento de normas técnicas, considerada uma das maiores instituições no

seguimento. Suas publicações envolvem normas técnicas, especificações, métodos de testes, periódicos, livros eletrônicos, manuais, documentos de conferências, entre outros. A norma técnica da ASTM D3039 refere-se aos ensaios de tração utilizando compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra para determinação das propriedades dos compósitos feitos a partir da resina epóxi. O método projetado para o teste tem o intuito de gerar dados de propriedades de tensão assim podendo ser usado para especificação de materiais, pesquisa e desenvolvimento, garantia de qualidade e análise estrutural.

O tamanho do corpo de prova é de 150 mm de comprimento, 20 mm de largura e 3 mm de espessura, dentro das especificações da norma. Para isso foi construído um molde de acrílico seguindo as dimensões do corpo de prova, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Molde em acrílico.

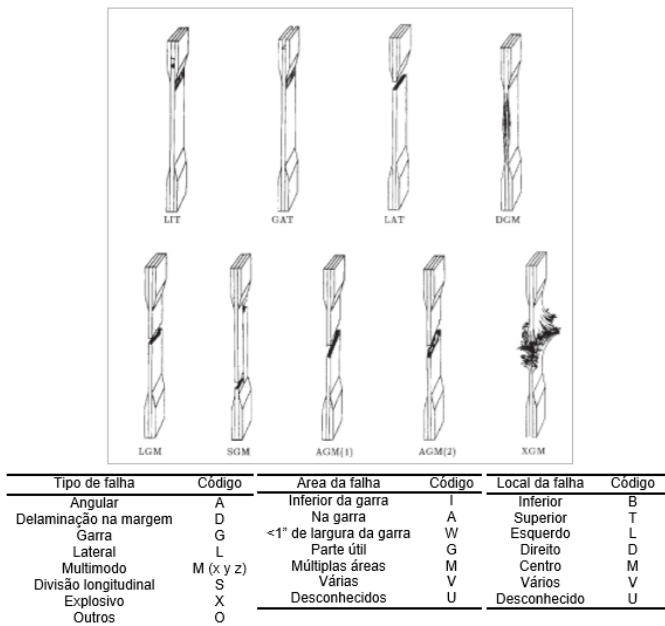


Fonte: Autor.

Para produzir as amostras de compósitos poliméricos utilizou-se a resina epoxi SQ 2001 com endurecedor SQ 3154 e tecido de fibra de carbono 200 (0°/90° - biorientada), fornecidos pela empresa Redelease. Segundo o fabricante (SILAEX, 2015), a resina epoxi SQ 2001 é uma resina epoxídica líquida que é baseado na reação da Epicloridrina com Bisfenol A e com endurecedor SQ 3154 à base de poliaminacicloalifática apresenta facilidade no manuseio, boa aplicação na laminação, dificilmente sofre com umidade, além de não gerar subprodutos. De acordo com as propriedades do sistema não curado, o fabricante especifica que para o tempo de utilização máximo da mistura situa-se entre 20 a 30 minutos a uma temperatura entre 18 a 30°C, e que para a cura total é de 24 a 48 horas. A interpretação do tipo de ruptura provocado no

corpo de prova, conforme a ASTM D3039, é feita através das características como tipo, área e local, como pode-se observar na Figura 5.

Figura 5 - Representação de alguns tipos e codificação de falhas a serem observadas nos ensaios de tração.



Fonte: ASTM D3039 (2014).

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizado a máquina de ensaio universal, aplicando a taxa de deformação de 2 mm/min.

Os dados obtidos nos ensaios de tração das cinco amostras utilizam o parâmetro da tensão de ruptura (σ_R), que é definida pela seguinte equação 1:

$$\sigma_R = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

De acordo com Callister (2002), é a relação entre F que é a representação da carga aplicada e A_0 que é a área de seção da objeto de estudo antes de ser aplicado a qualquer esforço, dado em MPa (Megapascal). Outro parâmetro utilizado é deformação de engenharia definida pela equação 2:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (2)$$

Onde l_i é representado pelo comprimento final do corpo, ou seja, após sua deformação e l_0 é o comprimento

inicial do corpo de prova (CALLISTER, 2002).

O processo de fabricação dos corpos de prova para esse experimento foi feito manualmente após realizar o corte de lâminas de fibra de carbono de acordo com as medidas do molde. Conforme SILAEX (2015), a proporção para a mistura entre a resina e o endurecedor é de 100:50 em peso, respectivamente. Antes de começar o preparo dos compósitos reforçados com fibra, foi aplicado no molde uma fina camada de cera de desmoldante a base de carnaúba, usada para desmoldar as peças de compósito evitando assim que a mesma fique aderida ao molde de acrílico. Por se tratar de fabricação manual a partir da resina, deve-se ter o cuidado na mistura dos componentes realizando o procedimento com menor agitação possível, para evitar a incorporação de ar e a consequente formação de bolhas, pois quanto mais bolhas de ar forem geradas e as mesmas não saírem durante o processo de cura ficando presas no corpo de prova, mais defeitos internos o mesmo terá, tornando-se menos resistente. Ou seja, se numa seção interna houver muitas bolhas próximas, a área de contato do material será menor gerando um defeito macro, tendendo a ruptura naquela região durante o ensaio.

O procedimento de construção do corpo de prova se inicia com a aplicação de uma camada da mistura epóxi no fundo do molde e em seguida é posicionada a lâmina de fibra de carbono e depois colocado uma camada da mistura, assim alternando os elementos, compósito-fibra-compósito. Em cada corpo de prova, a primeira e última camada sempre será da resina. Após, o molde é comprimido com uma tampa de acrílico para evitar deformações na superfície e internamente, como bolhas, desnível, falhas, entre outros.

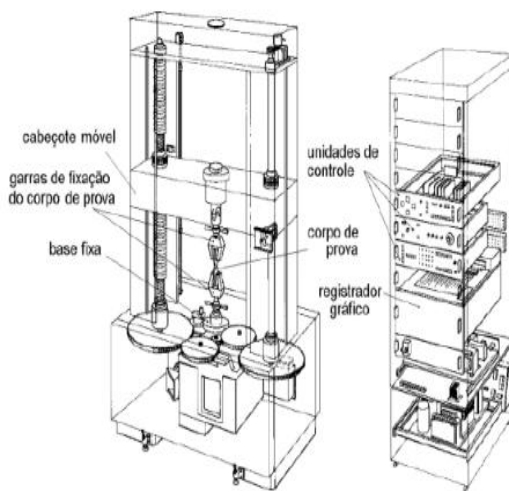
As estruturas dos corpos de prova foram confeccionadas com quantidades diferentes de tecido de fibra de carbono com a intenção de comparar reforço x resistência, gerando um gráfico demonstrativo com os resultados dos testes. Foram realizados ensaios com corpos de prova com resina epóxi puro (sem o reforço) e com 2, 3, 4 e 5 camadas, respectivamente.

Para determinar as propriedades mecânicas dos corpos de prova devido a interferência da quantidade de camadas de fibra de carbono, foram realizados testes de tração. Com os resultados obtidos, serão comparados com o teste realizado com a amostra apenas de epóxi puro, usando a norma ASTM D638 (para polímeros) e também com um cabo de aço de 1/16".

Com a realização dos testes do compósito polimérico, os dados resultantes comparados ao teste com o cabo de aço, possibilita examinar a probabilidade da substituição do cabo metálico por laminados a base de fibra de carbono revestidos de resina polimérica de acordo com a resistência obtida nesse reforço. Conforme Essel (2017), a máquina universal de ensaios (Figura 5) é o instrumento usado para a realização do

ensaio de tração, que apresenta este nome devido aos mais variados tipos de ensaios que a mesma executa, podendo ser tanto um equipamento hidráulico quanto eletromecânico. No ensaio de tração, a máquina aplica uma deformação constante no corpo de prova, na direção longitudinal em sentido oposto, fazendo o corpo de prova aumentar seu comprimento. A medição da força de resistência a essa deformação é medida por um dinamômetro ou célula de carga que está ligada na máquina de tração e através do gráfico de força e alongamento gerado pelo registrador durante o ensaio, obtém-se a curva tensão por deformação, que permite a extração de parâmetros (CALLISTER, 2002).

Figura 6 - Máquina Universal de Ensaio de Tração.



Fonte:Essel (2017).

Fixa-se o corpo de prova na máquina por suas extremidades, numa posição que permite ao equipamento aplicar-lhe uma força axial para fora, de modo a aumentar seu comprimento.

As principais associações de normas técnicas fornecem as normas que descrevem o procedimento do ensaio, bem como requisitos mínimos de resistência mecânica e dureza para diversas classes de materiais. (FREDEL, 2015).

C. Resultados

As amostras dos corpos de prova foram confeccionadas no molde em acrílico mostrado na Figura 3, seguindo os padrões da norma ASTM, 150 mm de comprimento, 20 mm de largura e 3 mm de espessura, obtendo uma rigidez mecânica maior por conta da inserção da fibra de carbono juntamente com a resina epóxi. O resultado pode ser visto na figura 7.

Figura 7 - Corpos de prova de materiais compósitos.



Fonte: Autor.

Na Figura 8, pode-se observar os tipos de rupturas ocorridos e classificados de acordo com a norma ASTM nas 4 amostras, sendo classificados como bem sucedido de acordo com a norma.

A interpretação do tipo de ruptura provocado no corpo de prova, conforme a ASTM D3039, é feita através das características como tipo, área e local, como podemos ver na Figura 6.

Figura 7 - Rupturas nos corpos de prova (A) 5 camadas; (B) 4 camadas; (C) 3 camadas e (D) 2 camadas.



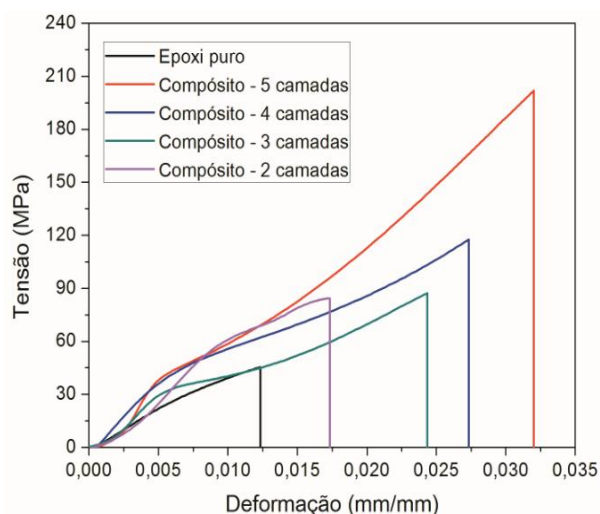
Fonte: Autor.

Na Figura 8(A), observa-se para a amostra do compósito de 5 camadas, apresentou o tipo de ruptura lateral, sem angulação, a área se encontra na parte útil do corpo de prova e na parte inferior, seguindo a codificação de rupturas

na Figura 8, código de ruptura é LGM. No compósito de 4 camadas, Figura8(B), a ruptura apresentou ângulo e a localização ocorreu na parte inferior, determinando o código de ruptura AGB. Na amostra de 3 camadas e 2 camadas, Figura8(C) e 8(D), o código de ruptura foi AGM 2.

Na Figura 9, pode-se observar o gráfico, onde são apresentados os dados das 5 amostras ensaiadas no teste de tração com base nos parâmetros de tensão por deformação, verificando-se que quanto maior a quantidade de tecidos de fibra de carbono, maior é o ponto de ruptura do compósito.

Figura 9 - Comparativo Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm).



Fonte: Autor.

Também é possível verificar que o reforço de fibra de carbono inibe o comportamento da matriz polimérica, no caso a resina epóxi, evitando que o compósito se rompa facilmente, por ser um material amorfo não é possível prever seu ponto de ruptura, pois o mesmo pode apresentar micro defeitos em sua extensão que não são perceptíveis aos olhos (CALLISTER, 2002), como podemos ver com relação a curva de Tensão (MPa) do epóxi puro e dos compósitos entre a Deformação (mm/mm).

Na Tabela 1, vemos como mais detalhes os resultados dos testes realizados, constatando o aumento da resistência do laminado, como podemos ver na coluna de tensão de ruptura, com o incremento de camadas de tecido de fibra de carbono

chega-se suportar cerca de 200 MPa quando adicionadas 5 camadas de reforço, e apresentou densidade próxima do epóxi puro. Com base nas medidas e nos cálculos, comprovou que o polímero reforçado com fibra de carbono consegue alcançar uma alta resistência sem perder a leveza da fibra.

Outra característica apresentada na figura 8, é referente a deformação de engenharia, quanto maior quantidade de reforço de fibra (camadas de tecido) no compósito, maior será sua deformação, como pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados comparativos dos ensaios entre as amostras.

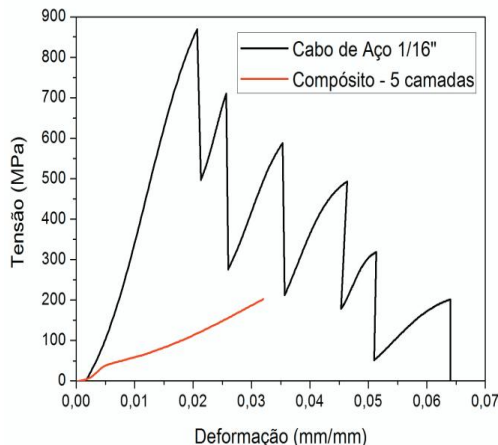
Amostra	Densidade Aparente (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Epóxi pura	1,16	4,91	50	12,3
Compósito - 2 camadas	1,16	8,13	85	17,4
Compósito - 3 camadas	1,20	8,13	89	24,3
Compósito - 4 camadas	1,24	8,72	116	27,2
Compósito - 5 camadas	1,29	13,34	200	32,0

Fonte: Autor.

Como o objetivo do trabalho é verificar a viabilidade de substituição do cabo de aço pelo polímero reforçado com fibra, na figura 10, encontra-se o gráfico, onde tem-se a comparação do cabo de aço de 1/16” com o compósito de 5 camadas. Observa-se que a tensão de ruptura do cabo de aço alcança cerca de 850 MPa contra os 200 MPa para a amostra de material compósito.

Figura 10 – Curvas Tensão x Deformação comparando-se

a mostra de compósito reforçado com 5 camadas e um cabo de aço 1/16"



Fonte: Autor.

Devido ao resultado obtido com o ensaio, percebe-se que pela quantidade de lâminas de tecido utilizados no corpo de prova tem-se duas opções para a possível substituição: uma seria produzir o corpo de prova com uma quantidade maior de lâminas de fibra de carbono aumentando sua resistência a ruptura, encontrando uma quantidade compatível; ou utilizar de 4 a 5 corpos de prova em paralelo pois assim a soma da sua resistência equivale ao cabo.

Os resultados com relação a densidade aparente dos compósitos demonstraram uma pequena variação entre cada amostra, entre 1,16 a 1,29 g/ml, assim comprovando que as lâminas de fibra de carbono não alteram o peso específico do polímero, de acordo com o fabricante Silaex é de 1,16 g/ml, mantendo praticamente a leveza da resina.

II. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostraram que as densidades das amostras com o reforço tiveram valores bem próximo da amostra de epóxi pura provando assim que adição de lâminas de tecido de fibra de carbono não provoca aumento aparente do peso específico do material, mantendo a característica de leveza. Observa-se também que o aumento das camadas de fibra ocasionou o aumento da tensão de ruptura, mostrando que o aumento de camadas aumenta a resistência do composto.

Com relação ao comparativo com o cabo de aço podemos afirmar que para o compósito de 5 camadas, para se aproxime da propriedade de tensão de ruptura do cabo é necessário acrescentar pelo menos 4 vezes mais o compósito

para que obtenha a mesma resistência. Se aplicado na ideia inicial deste trabalho que seria na substituição de cabos de elevadores, teríamos que adicionar cerca de 5 vezes mais compósitos reforçados com fibra de carbono para cada cabo de aço, entretanto devido a resina epóxi utilizada apresentar uma certa rigidez mecânica, torna o compósito não flexível, inviabilizando o mesmo nessa substituição. Seria necessário substituí-lo por uma resina que tenha em seu composto mais flexibilidade e maleabilidade. A ideia de possibilidade na substituição no uso de cabos de aço se deve a empresa finlandesa KONE que já utiliza esse princípio de cabos de polímero reforçado com fibra de carbono em algumas áreas de aplicações da empresa.

Concluindo, a aplicação no uso de cabos para elevadores seria inviável considerando a resina epóxi, pois o compósito não tem propriedade flexível como o cabo de aço, seria necessário substituir por uma resina com propriedade elastomérica e resistência equivalente. Entretanto também pode ser viável tratando-se da questão de massa e resistência da fibra, em razão de que mesmo utilizando uma quantidade maior de material em relação ao cabo de aço, torne-se resistente e eficaz, mas sensivelmente mais leve que o mesmo.

III. AGRADECIMENTO

Agradecemos ao Centro Universitário ENIAC pelo apoio incondicional, financeiro e as bolsas de estudo custeadas pela instituição.

IV. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, R. C.; DUTRA, R. A.; VASCONCELLOS, W. A. Pinos intra-radulares de fibras de carbono em restaurações de dentes tratados endodonticamente. **Revista da Associação Paulista de Cirurgiões Dentistas**, São Paulo, v. 52 (6), 1998, p. 441-444.

ASTM D638-14, **Método de Teste Padrão para Propriedades de Tração de Plásticos (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics)**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D3039 / D3039M-1, **Método de Teste Padrão para Propriedades de Tração de matriz de polímero de Materiais Compósitos (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials)**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda., 2007.

BRENA, S. F. et. al. Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites. **ACI Structural Journal**, v.100, p. 36-46, 2003. Disponível em: <www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=12437>. Acessado em 14 de março de 2017.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 5. ed. São Paulo: LTC., 2002.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma abordagem integrada**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC., 2006.

CONSTRUCTION INNOVATION FORUM. 2014. Disponível em: <www.cif.org>. Acessado em 19 de abril de 2017.

ESSEL Eletromecânica. **Ensaio de materiais. Ensaio de tração: procedimentos normalizados**. Cursos Online. 2017. Disponível em <<http://essel.com.br/cursos/material/01/ensaio.htm>> Acessado em 10 de março de 2017.

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. **Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais**. CERMAT. v. 1 , 2015. Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos do Departamento de Eng. Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

KONE corporation. **KONE: high-risesolutions**. 2013. Disponível em: <<http://www.kone.com>>. Acessado em 23 de março de 2017.

MCADAMS, L. V.; GANNON, J. A. **Epoxy Resins. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. p 322-382. Vol. 6, 1988. H. F. Mark, N. M. Bikales, C. G. Overberg, e G. Menges, eds., Nova Iorque: Wiley Interscience, 1988.

PARDINI, L. C., **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 2ª.Ed, revista e ampliada. São Paulo: Blücher,2016

REDELEASE.**Loja Virtual**. Comércio de produtos para Indústria, 2017. Disponível em: <<http://www.redelease.com.br/lojavirtual/>>. Acessado em 24 de fevereiro de 2017.

REZAEI, F. **Development of short carbon fibre reinforced polypropylene composite for car bonnet**. 2006. Tese (Mestre em Ciência) - Universidade PutraMalaysia. Malásia, 2006.

SANTOS, Altair.**Concreto têxtil, o futuro do concreto armado**. Massa cinzenta. 2015. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/concreto-textil-concreto-armado/>>. Acessado em 10 de março de 2017.

SILAEX QUÍMICA. **Epóxi**. 2015. Disponível em: <<http://www.silaex.com.br/epoxi.htm>> Acessado em 23 de fevereiro de 2017.

SILVA, L. C. **Comportamento balístico de compósitos epóxi - Fibra natural em blindagem multicamada**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

MALNATI, P. **Bridge cost cut with inflatable arches**. Composites world. 2009. Disponível em: <<http://www.compositesworld.com/articles/bridge-cost-cut-with-inflatable-arches>>. Acessado em 13 de abril de 2017.

ZANATTA, R. **Materiais compósitos na aviação: Os materiais que prometem reduzir o peso e o consumo das aeronaves modernas**. 2012. Disponível em: <<http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/>>. Acessado em 13 de abril de 2017.

ZOLTEK™. **CommercialCarbonFiber**. 2017. Disponível em :<<http://zoltek.com/carbonfiber/>> . Acessado em 14 de abril de 2017.

Substituição do processo de expansão pela soldagem TIG (GTAW) na fixação de tubos em trocadores de calor

B.L.A. Santos¹; W.S. Alves²; A.C.N. Jesus³; C. J. Kan⁴

Resumo — A fabricação de trocadores de calor é um processo que envolve diversas etapas como o processo de união dos tubos nos furos do espelho. O processo utilizado atualmente por algumas empresas é a expansão destes tubos nos furos do espelho. A expansão dos tubos é um processo demorado e que não garante a estanqueidade da união. Os vazamentos são detectados durante o teste pneumático. Um processo alternativo para realizar a união dos tubos no espelho do trocador de calor é a soldagem. Além da soldagem será feito teste de líquido penetrante para verificação de imperfeições que podem levar a um vazamento no teste de estanqueidade. O processo de soldagem apresentou tempos menores quando comparado com o processo de expansão. O ensaio de líquido penetrante também apresentou bons resultados, pois evitou o retrabalho após o teste de pneumático.

Palavra-Chave: Soldagem, Trocador de calor, Tubos

Abstract - The manufacture of heat exchangers is a process that involves different steps such as the process of joining the tubes in the mirror holes. The process used currently by some companies is the expansion of these tubes in the holes of the mirror. The expansion of the pipes is a time consuming process and does not guarantee the tightness of the joint. Leaks are detected during the pneumatic test. An alternative process to realize the union of the tubes in the mirror of the heat exchanger is the welding. In addition to the welding will be done penetrating liquid test to check for imperfections that can lead to a leak in the tightness test. The welding process presented smaller times when compared to the expansion process. The penetrating liquid test also showed good results, as it avoided rework after the tire test.

Keyword: Welding, Heat Exchanger, Tubing

INTRODUÇÃO

A função dos trocadores é realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos com temperatura diferente. Este dispositivo pode ser usado na produção de energia,

aquecimento e resfriamento de ambientes, processos químicos, etc. Devido às novas políticas de conservação de energia, os projetos de trocadores de calor são constantemente aperfeiçoados para melhorar seu desempenho [1]. Nos trocadores de calor temos dois fluidos circulando por dois circuitos independentes, sendo o fluido quente e o fluido frio. Um desses fluidos passa por dentro dos tubos do feixe tubular, que é denominado fluxo pelos tubos; o outro fluido passa por fora do feixe tubular, que é denominado fluxo pelo casco. Esses dois circuitos são usualmente designados como lado dos tubos e lado do casco respectivamente. Cada um desses dois circuitos pode ser feito em uma só passagem, ou em várias passagens sucessivas. Com esses circuitos, denomina-se o nome trocador de calor [2].

O trocador de calor é um componente essencial para o sistema de refrigeração de uma unidade compressora, sendo um dos principais responsáveis pelo correto funcionamento do ciclo de refrigeração do sistema, esse sistema pode ser fechado ou aberto, onde o trocador é responsável pela transferência de calor, seja aquecimento ou resfriamento. O ciclo de refrigeração é a forma de transferência de calor, de um ponto de baixa temperatura para um ponto de alta temperatura, através das entradas e saídas de calor, como demonstrado na Figura 1 a seguir.

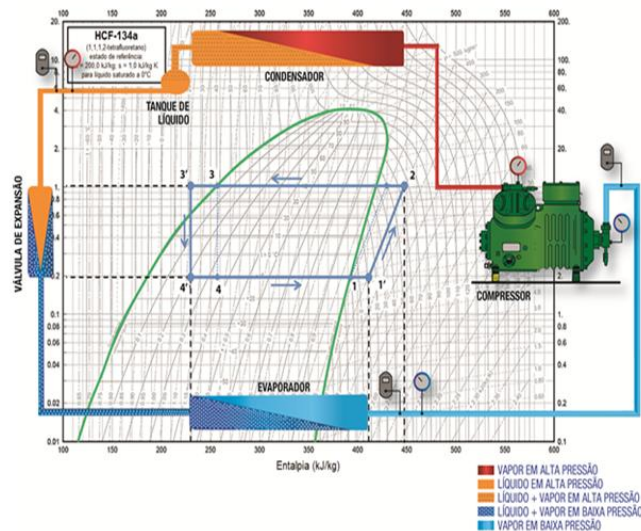


Fig. 1. Ciclo de refrigeração. [3]

B. L. A. Santos¹, Graduando do Curso de Engenharia de Produção - Centro Universitário ENIAC (e-mail: bruno.leonardo@globo.com).

W. S. Alves², Graduando do Curso de Engenharia de Produção - Centro Universitário ENIAC (e-mail: williansgiovanna06@gmail.com).

A. C. N. Jesus³, Professor Mestre, Pesquisador do NUPE - Núcleo de Pesquisa ENIAC, Centro Universitário ENIAC (e-mail: antonio.jesus@eniac.edu.br).

C. J. Kan⁴ Professor Doutor em tecnologia da informação - Professor do Centro Universitário ENIAC (e-mail: cao.ji@eniac.edu.br)

A falha no funcionamento de um trocador de calor pode acarretar na parada parcial do sistema, ou até mesmo na parada total. Outro ponto é a sua aplicação, pois atua diretamente com o fluido aplicado no sistema, onde um vazamento pode ocasionar um problema com danos sérios ao meio ambiente, ou até mesmo, a uma fatalidade do porte de grandes proporções.

A. Fabricação dos trocadores de calor

O trocador de calor, objeto deste estudo, serve para resfriar o óleo que circula dentro do equipamento. No lado tubo, circula amônia líquida em baixa temperatura, com pressão aproximada de 10kgf/cm². Já no lado casco, passa o óleo a ser resfriado, com pressão aproximada de 13 kgf/cm². A fabricação do trocador é realizada através de processos lentos e de pouca confiabilidade. O trocador é constituído por um tubo de diâmetro variado entre 8 a 12 polegadas, no interior do mesmo é constituído por um feixe de tubos trefilados com diâmetro de 19 mm, e chicanas que são montadas intercaladas e em suas duas extremidades são montados dois espelhos, os tubos trefilados são encaixados dentro dos furos que tem no espelho. Após a montagem do mesmo, é realizada a expansão (Figura 2) dos tubos trefilados por meio de um equipamento de expansão e o torque é controlado por um limitador.



Fig. 2. Detalhe do processo de expansão dos tubos trefilados. [Fonte: Autor]

Após a expansão, é realizado o primeiro teste de pressão, sendo no lado dos tubos, onde é verificado se há vazamentos entre os tubos e o espelho. Este processo demora aproximadamente 11 horas e 30 minutos para ser finalizado, onde se ocorrer algum vazamento, será necessário refazer a expansão de todos os tubos novamente, e realizar novo teste. Com isso, o tempo de fabricação sobe para 23 horas. Após a conclusão dessa etapa, entra a finalização do trocador, com a montagem das tampas de entrada e saída de amônia, que são parafusadas. Nesta etapa há uma grande perda de tempo, com a montagem das tampas e o teste do lado do casco, demorando aproximadamente 03 horas, onde se aparecer vazamentos na tampa, será necessário realizar todo o procedimento novamente, durando mais 03 horas. O objetivo deste trabalho é propor uma melhoria no processo de união dos tubos com o espelho, onde os tubos que eram expandidos serão soldados (Figura 3). Com essa mudança de processo irá ocorrer diminuição no tempo de fabricação, é uma melhora na estanqueidade dos tubos, pois será acrescentado no processo, um ensaio não destrutivo por líquido penetrante, para

averiguar se há trincas nos tubos trefilados e na solda, evitando que seja refeito o teste pneumático.

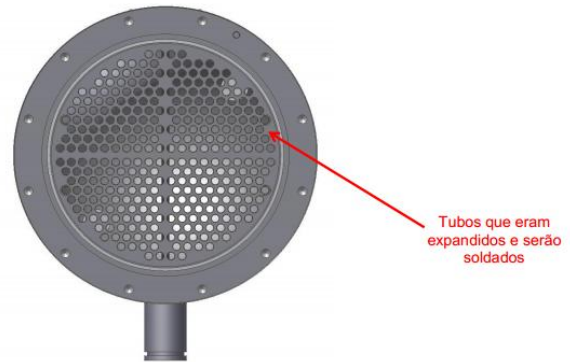


Fig. 3. Região onde os tubos serão soldados no espelho do trocador de calor. [Fonte: Autor]

MATERIAIS E MÉTODOS

A. Soldagem

Foi utilizado o processo a arco gás – tungstênio, chamado também de TIG (*Tungsten Inert Gas*). O metal de adição utilizado foi o ER 705-3 e o material do espelho é um aço ASTM A516 grau 70. O tubo que será fixado no trocador de calor é de aço baixo carbono sem costura trefilado conforme norma ASTM A179.

O estudo para a melhoria começou no desenvolvimento da aplicação da soldagem no espelho, como demonstrado na Figura 4. Foi desenvolvido um espelho com chanfro na cavidade para os tubos, para uma melhor penetração da soldagem, a fim de evitar qualquer tipo de vazamento.

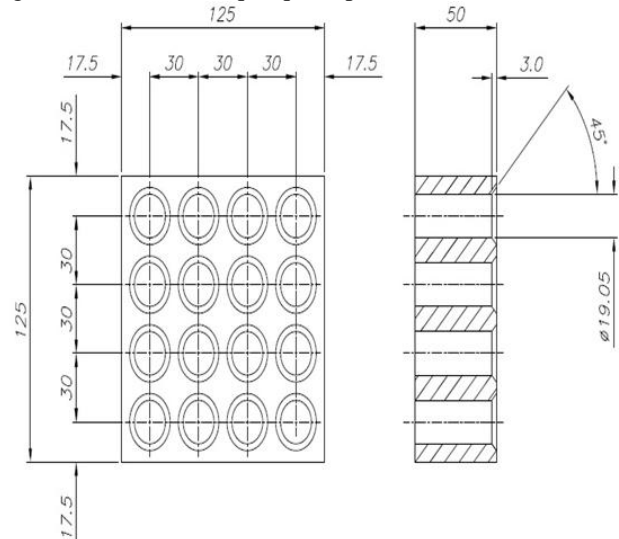


Fig. 4. Esquema do chanfro do espelho. [Fonte: Autor]

B. Ensaio de líquido penetrante

Com a soldagem, teve-se a possibilidade de aplicar um ensaio não destrutivo por líquido penetrante. Este ensaio apresenta uma maior garantia, pois possibilita a verificação de descontinuidades superficiais (trincas, poros, mordeduras, falta

de fusão, falta de penetração), assim, evitando a perda de tempo no teste pneumático, onde pode nos mostrar se há alguns possíveis pontos para vazamentos.

O ensaio por líquido penetrante consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido vermelho, denominado penetrante; após a remoção do excesso de líquido na superfície, faz-se o líquido retido sair da descontinuidade por meio da aplicação de um revelador. A imagem da descontinuidade fica, então, desenhada sobre a superfície [4].

Os ensaios de líquido penetrante foram realizados conforme ABNT NBR 16450:2016 [5].

DISCUSSÃO E RESULTADOS

Como pode ser analisado na tabela I, o tempo de fabricação do tubo foi reduzido devido a alteração de processo de fixação dos tubos no espelho. O processo de soldagem quando comparado com o processo de expansão reduziu em 28,6% o tempo de fabricação (8 horas/unidade).

A fixação dos tubos pelo processo de solda TIG produziu uniões mais estanques, pois o arco elétrico na soldagem TIG é bastante estável [6]. Após a soldagem é realizado o ensaio de líquido penetrante para verificar a ocorrência de trincas. Caso sejam reveladas trincas, esta região é novamente soldada antes do ensaio pneumático. A figura 5 mostra os tubos fixados no espelho pelo processo de soldagem TIG, não houve ocorrência de trincas e descontinuidades superficiais.



Fig. 5. Tubos soldados pelo processo TIG no espelho do trocador.

[Fonte: Autor]

TABELA I
COMPARAÇÃO DOS TEMPOS ENTRE OS PROCESSOS ANTIGO (UNIÃO POR EXPANSÃO) NOVO (UNIÃO POR SOLDAGEM).

Etapas	Tempo do Processo Antigo	Tempo do Processo Novo
Corte do tubo do corpo	30 min	30 min
Traçagem dos bocais	30 min	30 min
Abertura dos bocais	30 min	30 min
Montagem dos bocais	30 min	30 min
Soldagem dos bocais	4 horas	4 horas
Montagem do feixe tubular	3 horas	3 horas
Montagem dos espelhos	1 hora	1 hora
Expansão dos tubos nos espelhos	10 horas e 30 min	-
Soldagem dos tubos nos espelhos	-	2 horas
Ensaio não destrutivo	-	30 min
Teste pneumático (lado dos tubos)	1 hora	1 hora
Montagem das tampas de entrada e saída	1 hora	1 hora
Soldagem das tampas de entrada e saída	2 horas	2 horas
Montagem das tampas no corpo	2 horas	2 horas
Ensaio visual de solda	30 min	30 min
Teste pneumático (lado do casco)	1 hora	1 hora
TOTAL	28 horas	20 horas

Abaixo a Tabela II, apresenta o custo de fabricação do processo antigo e a tabela III o custo de fabricação do processo novo. Houve uma redução 6,65% de valor na fabricação do equipamento com a utilização do processo novo comparado com o processo antigo, mostrando que não foi somente viável com a diminuição de tempo, mas também com a diminuição dos custos de fabricação. Esta redução no custo de fabricação é devido a mão de obra da soldagem ser menos onerosa que a mão de obra no processo de expansão.

TABELA II
CUSTO DE FABRICAÇÃO DO PROCESSO ANTIGO.

Processo Antigo	
Etapas	Valores (R\$)
Materials	13.851,51
Mão de obra na montagem e soldagem	3.022,50
Mão de obra na expansão dos tubos	1.627,50
Mão de obra no teste pneumático	155,00
TOTAL (R\$)	18.656,51

TABELA III
CUSTO DE FABRICAÇÃO DO PROCESSO NOVO.

Processo Novo	
Etapas	Valores (R\$)
Materials	13.851,51
Mão de obra na montagem e soldagem	3.022,50
Mão de obra na soldagem dos tubos	310,00
Mão de obra no ensaio	77,50
Mão de obra no teste pneumático	155,00
TOTAL	17.416,51

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de soldagem TIG apresentou resultados satisfatórios, no entanto, neste trabalho não foi possível apresentar detalhes das regiões das juntas pelos dois processos estudados. Estudos adicionais envolvendo análise metalográfica das regiões soldadas e expandidas serão realizados. A análise metalográfica destas regiões podem fornecer detalhes do aspecto das trincas que causaram vazamentos no processo de expansão, bem como detalhes da região do processo de soldagem mostrando a região sem defeitos.

CONCLUSÃO

A mudança no processo de fixação dos tubos trefilados por expansão para a soldagem foi de grande importância para a empresa, onde houve, redução de tempo para a fabricação de cada equipamento, além de redução de custo no valor final do equipamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições dos professores: Dr. Daniel Oliveira e Dr. Thiago Assumpção, ambos do NUPE – ENIAC.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] F. Kreith, *Princípio de Transferência de Calor*, 7ª ed., São Paulo: Cengage Learning, 2014, p. 67.
- [2] P. C. S. TELLES, *Vasos de Pressão*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001, p.120.
- [3] HEATMKT. Conceitos básicos de refrigeração. Disponível em <<http://www.resfriando.com.br/conceitos-basicos-de-refrigeracao/>>. Acesso em 19 mar. 2017.
- [4] SENAI. Soldagem - Área Metalurgia. São Paulo: SENAI-SP, 2013.
- [5] ABNT NBR 16450: 2016 – *Ensaio não destrutivo – Líquido Penetrante – Qualificação de Procedimento*, fevereiro 2016

Estudo da Interferência de Nanotubos de Carbono no Regime de Operação de Transistores MOSFET

Study of Carbon Nanotubes Interference in the MOSFET Transistors Operation Regime

Thiago M. de Lima^{1*} e Thiago A. A. de Assumpção²

Resumo: Os transistores são componentes eletrônicos que possuem uma ampla área de aplicação, como TI, automotiva, industrial, aeronáutica entre outros. Porém, a sua fabricação em escala nanométrica está chegando ao seu limite físico, com isso, limitando o avanço de novos produtos e componentes com melhores desempenhos. O objetivo deste trabalho é analisar as propriedades dos transistores MOSFET tradicionais e dos CNFETs (transistores compostos por nanotubos de carbono), comparando-os com diferentes espessuras de óxido de porta, juntamente com dois tipos de materiais isolantes distintos, o dióxido de silício e o dióxido de háfnio. Para análise de todos os parâmetros referentes a ambos os transistores e caracterização das dimensões dos nanotubos de carbono, foi verificada por meio de pesquisas bibliográficas as formas de modelagem dos componentes citados. Para o desenvolvimento dos cálculos foram utilizados dois programas distintos, o ENIMOS desenvolvido em C# utilizando a plataforma de desenvolvimento Visual Studio da Microsoft, e o FETToy desenvolvido na plataforma MATLAB por alunos das universidades de Purdue University, University of Florida, University of Illinois, Southern Illinois University e IBM. Em posse de tais ferramentas, foi possível notar que, embora os transistores tradicionais tenham maiores valores de corrente quando utilizado o dióxido de háfnio em comparação com o dióxido de silício, os transistores CNFET possuem maior velocidade de saturação principalmente por conta das propriedades provenientes dos nanotubos de carbono. Isto permite com que este transistor apresente um desempenho melhor que os tradicionais.

Palavras-Chave: MOSFET. CNFET. FETToy. Simulação MATLAB.

Abstract: Transistors are electronic components that have a wide application area, such as IT, automotive, industrial, aeronautics and others. However, its nanoscale manufacturing is reaching its physical limit, thereby limiting the advance of new products and components with better performances. The aim of this work is to analyze the properties of the traditional MOSFET transistors and the CNFETs (transistors composed of carbon nanotubes), comparing them with different thicknesses of gate oxide, and also with two types of different insulating materials, Silicon dioxide and Hafnium dioxide. For the analysis of all the parameters related to both transistors and characterization of the

carbon nanotubes dimensions, it was verified through bibliographical research the modeling methods for the mentioned components. For the calculations development, two distinct programs were used, the ENIMOS developed in C# using the Microsoft Visual Studio development platform, and the FETToy developed in the MATLAB platform by students from Purdue University, University of Florida, University of Illinois, Southern Illinois University and IBM. In the presence of such tools, it was possible to note that although traditional transistors have higher current values when hafnium dioxide is used in comparison with silicon dioxide, the CNFET transistors have a higher saturation velocity mainly due to the properties of the nanotubes of carbon. This allows this transistor to perform better than traditional ones.

Keywords: MOSFET. CNFET. FETToy. MATLAB Simulation.

I. INTRODUÇÃO

Os processadores são dispositivos eletrônicos que possuem uma alta capacidade de processamento, que vêm tendo uma grande evolução desde suas primeiras versões. Porém, pesquisas atuais mostram que dificilmente essa previsão se manterá até o ano de 2026, pois os transistores a base de silício estão chegando ao seu limite físico e eletrônico [1]. Em janeiro de 2007 a Intel apresentou a sua nova família de processadores que utilizava em sua fabricação um novo tipo de material isolante que possuía como característica um alto valor de constante dielétrica, permitindo a diminuição da porta do transistor [2]. Mas essa nova tecnologia assim como a anterior chegou ao seu limite físico e o grande desafio é descobrir novas tecnologias para dar continuidade ao desenvolvimento dos transistores. Um novo tipo de material que promete ajudar nesta evolução é o nanotubo de carbono, material derivado do próprio carbono, sendo este mais uma de suas formas alotrópicas. Estudos apontam que há a possibilidade de utilizar os nanotubos na fabricação de transistores e que são capazes de alterar suas características de desempenho elétrico. Basicamente, existem três variações estruturais dos nanotubos de carbono, sendo eles, os nanotubos de parede simples (SWNT – Single walled nanotube), paredes duplas (DWNT – Double walled nanotube) e paredes múltiplas (MWNT – Multi-walled nanotube).

¹Acadêmico, Curso de Engenharia Mecatrônica, Centro Universitário ENIAC (thiagolima0993@gmail.com). *Para quem o contato deve ser realizado.

²Doutor em Ciências, Professor nos cursos de Engenharia e Pesquisador do Núcleo de Pesquisa – NUPE do Centro Universitário ENIAC (thiago.alexandre@eniac.edu.br).

Devido essa variação estrutural as características eletrônicas e mecânicas são definidas a partir de sua quiralidade e da forma que o nanotubo é enrolado [3,4,5].

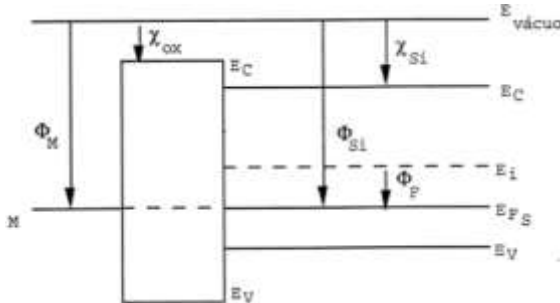
O trabalho em questão tem como objetivo avaliar a interferência dos nanotubos de carbono na velocidade de saturação dos transistores do tipo MOSFET quando utilizados como parte dos materiais envolvidos na construção destes dispositivos.

Esta análise será realizada por meio de simulações e gráficos, verificando a influência na corrente entre dreno e fonte quando utilizado transistores com diferentes tamanhos e espessuras de óxido de porta como SiO₂ e HfO₂.

Para análise destes parâmetros é necessário determinar a tensão limiar (V_T), a curva da corrente de dreno e fonte (I_{DS}) em função da tensão de dreno e fonte (V_{DS}) que varia de acordo com a tensão aplicada na porta (V_{GS}), entre outros parâmetros.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Por meio de pesquisas bibliográficas, procurou-se verificar como são realizados os cálculos de modelamento do transistor MOSFET, e sua análise se inicia a partir do capacitor MOS. O capacitor MOS se encarrega de controlar as cargas capacitivas atuantes na região da porta do transistor, influenciando diretamente em seu funcionamento. Alguns dos parâmetros que cancelam os efeitos de cargas parasitas dos materiais compostos na porta do transistor são materiais com mesmo nível de Fermi, nas mesmas condições térmicas e com densidade de cargas nulas [6], ou seja, o que seria um caso ideal como mostrado na Figura 1.

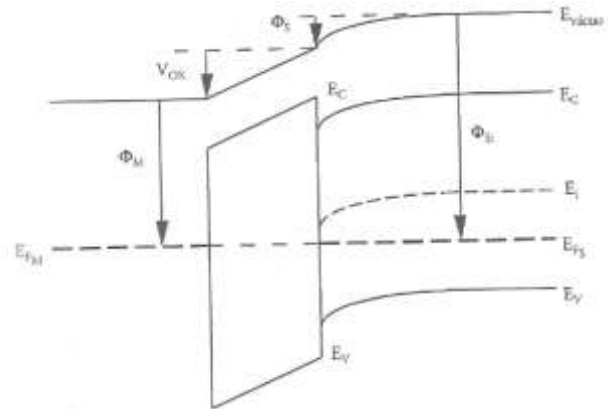


METAL – ÓXIDO – SEMICONDUTOR
Figura 1 – Diagrama de banda da estrutura MOS ideal [6].

Onde:

- χ_{Si} – Afinidade eletrônica do silício
- χ_{ox} – Afinidade eletrônica do óxido
- Φ_{Si} – Função de trabalho do silício
- Φ_F – Potencial de Fermi
- Φ_M – Função de trabalho
- E_C – Nível de condução
- $E_{vácuo}$ – Nível de vácuo
- E_i – Nível intrínseco
- E_{Fs} – Nível de Fermi do semicondutor
- E_V – Nível de valência

A Figura 1 apresenta as bandas de energias da estrutura de um capacitor MOS ideal (Metal, Óxido e Semicondutor), ou seja, não está sendo considerado nenhum tipo de carga influente. Mas isso não é o que realmente acontece, pois a estrutura MOS é submetido a diversos tipos de cargas denominadas Q_{SS} (Densidade de cargas efetivas no óxido de porta) e diferentes níveis de Fermi entre metal e semicondutor como mostrado na Figura 2. Com isso, é necessário determinar parâmetros como a tensão de faixa plana (V_{FB}) que se refere a tensão aplicada na porta com valores menores que V_T. As tensões aplicadas na porta do transistor variam conforme a região de operação a ser estudada. No transistor N-MOSFET verifica-se a região sublimiar aplicando um V_{GS} negativo, e para estudar as regiões superiores a V_T é necessário aplicar um V_{GS} positivo. Da mesma forma o transistor P-MOSFET, porém com valores de tensões inversos [6,7]. Com isso, descobre-se a condição inicial do transistor MOSFET, podendo estar em duas regiões de operação distintas apresentados na Figura 3(a) região de acumulação; e Figura 3(b) região de depleção.



METAL – ÓXIDO – SEMICONDUTOR
Figura 2 – Diagrama de banda da estrutura MOS [6].

A tensão de banda plana é definida pela equação (1):

$$V_{FB} = -\frac{Q_{SS}}{C_{OX}} + \Phi_{MS} \quad (1)$$

Onde:

- Q_{SS} – Densidade de cargas efetiva no óxido de porta.
- Φ_{MS} – Diferença de função de trabalho entre metal e semicondutor.
- C_{OX} – Capacitância da porta por unidade de área.

A diferença de função de trabalho entre metal e semicondutor apresentada na equação 1 é deduzido a partir da aplicação de tensão na porta, onde a diferença de potencial aplicada, fica parte sobre o metal (Φ_M) e o silício (Φ_{Si}).

$$\Phi_{MS} = \Phi_M - (\Phi_{Si} + \Phi_F) \quad (2)$$

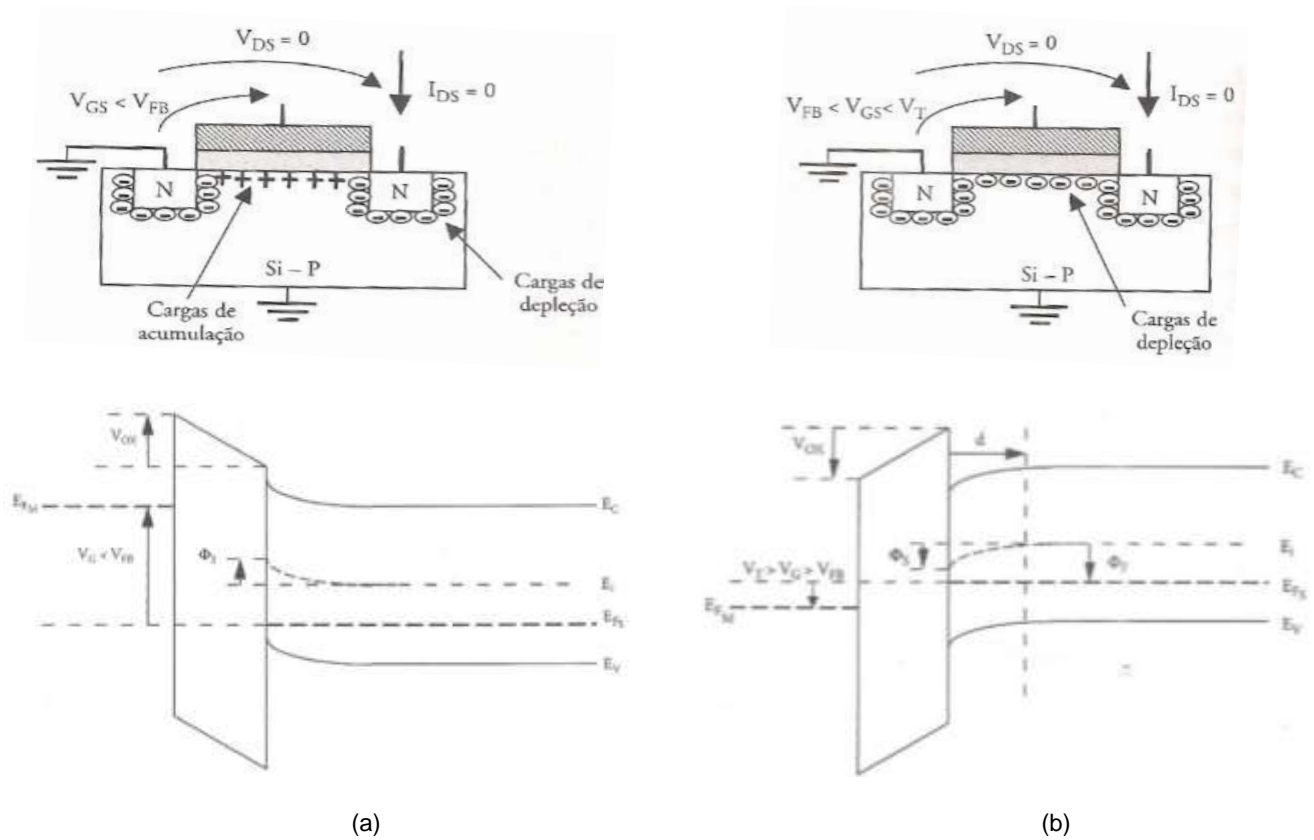


Figura 3 – Diagrama de banda da estrutura MOS em referência ao regime de operação em (a) acumulação e (b) depleção de um transistor NMOSFET [6].

Como pode ser visto na Figura 3(b) a partir da aplicação de uma diferença de potencial na porta do transistor, há um afastamento dos portadores majoritários no substrato de silício que é diretamente proporcional a diferença de potencial aplicada, visto que é necessário respeitar a seguinte condição, $V_{FB} < V_{GS} < V_T$ para que o transistor não se encontre no regime de operação de acumulação Figura 3 (a). Porém esta largura de depleção representada pela letra “d” possui um limite de acordo com que se eleva a tensão aplicada, sendo $V_{GS} \cong V_T$. Esta largura limite é chamada de largura máxima da região de depleção d_{max} , e pode ser determinada a partir da equação (3) e (4) [6].

Substrato tipo P

$$d_{max} = \sqrt{\frac{4 \cdot \epsilon_{Si} \cdot \Phi_F}{q \cdot N_x}} \quad (3)$$

Substrato tipo N

$$d_{max} = \sqrt{\frac{4 \cdot \epsilon_{Si} \cdot |\Phi_F|}{q \cdot N_x}} \quad (4)$$

Onde:

ϵ_{Si} – Permissividade do silício

q - Carga elementar do elétron $1,6 \times 10^{-9}$ C

Φ_F – Potencial de Fermi

N_x - Concentração de impureza

O potencial de Fermi é definido a partir do dopante do substrato, podendo ser do tipo P ou tipo N [8].

Substrato tipo P

$$\Phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (5)$$

Substrato tipo N

$$|\Phi_F| = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (6)$$

Onde:

k – Constante de Boltzmann $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T – Temperatura absoluta (K)

n_i – Concentração intrínseca de portadores

N_a – Concentração de impureza aceitadoras do semiconductor.

N_d – Concentração de impureza doadora do semiconductor.

A capacitância do óxido de porta por unidade de área C_{ox} da equação (1) é dado pela seguinte equação:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} \quad (7)$$

Nos estágios seguintes de operao do transistor MOSFET a tensão de banda plana deixa de afetar o transistor MOSFET que passa ser controlado a partir de V_T e pelas variaes de V_{GS} como pode ser visto na Figura 4 [6].

Onde:

ϵ_{ox} – Permissividade do oxido.

T_{ox} – Espessura do oxido.

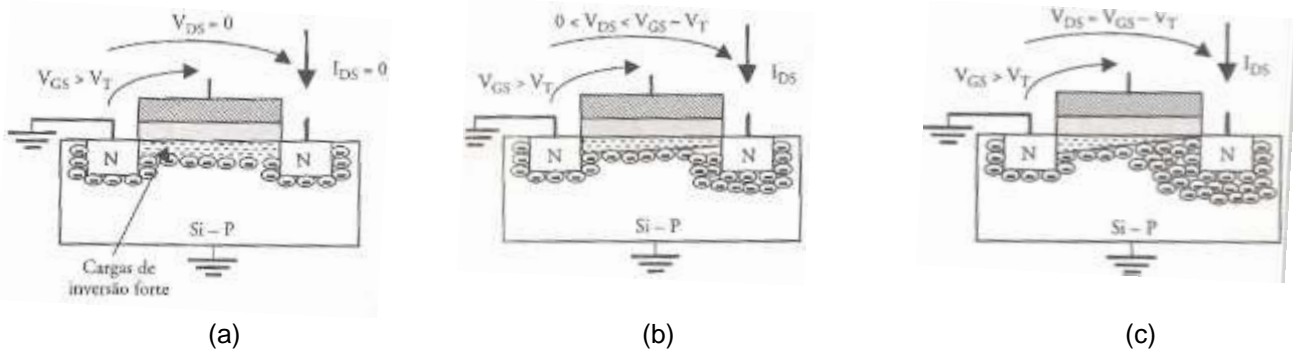


Figura 4 – Regime de operao do transistor NMOSFET [6].

A Figura 4(a) apresenta o transistor NMOSFET no regime de operao de inversão forte, isso ocorre quando V_{GS}  maior que a V_T e $V_{DS} = 0$, com isso, obtm-se uma atrao entre as cargas da fonte e porta, e fonte e dreno. Criando um canal negativo entre as interfaces do substrato do tipo P e do material dielétrico. Na qual permite a passagem da corrente que sempre fluirá do sentido do dreno a fonte, porém, devido ao valor de V_{DS} ser igual a zero a corrente que percorre o canal  desprezvel.

A Figura 4(b) apresenta o transistor NMOSFET no regime de operao tríodo, onde temos V_{DS} trabalhando na seguinte condio $0 < V_{GS} - V_T < V_{DS}$. Como a tensão aplicada no dreno  superior a fonte, a camada de inversão no transistor será superior ao lado do dreno, com isso, obtemos um aumento de corrente que  diretamente proporcional a tensão da porta e dreno.

A Figura 4(c) apresenta o momento de transio do regime de operao tríodo para saturao, basicamente  uma continuao do regime de operao anterior, porém neste caso, ocorre o pinçamento da camada de inversão, que corresponde a uma tensão V_{DS} especifica, ou seja, $V_{DS} = V_{GS} - V_T$. Também chamado de V_{Sat} (Tensão de Saturao), pois após esse momento, qualquer valor superior de tensão acrescentado em V_{DS} não implicará em um aumento de corrente, ou seja, o transistor está em regime de saturao.

Todos os parâmetros citados anteriormente são importantes para determinar a tensão de limiar do transistor MOSFET, lembrando que, a tensão de limiar refere-se ao valor de tensão aplicada a porta do transistor que altera seu regime de operao para inversão forte, como apresentado na Figura 4(a). A equao de tensão limiar para os substratos do tipo P e N são apresentado a seguir.

Substrato tipo P

$$V_T = \frac{\sqrt{4 \cdot q \cdot N_x \cdot \epsilon_{si} \cdot \Phi_F}}{C_{OX}} + 2\Phi_F + V_{FB} \quad (8)$$

Substrato tipo N

$$V_T = \frac{\sqrt{4 \cdot q \cdot N_x \cdot \epsilon_{si} \cdot |\Phi_F|}}{C_{OX}} - 2\Phi_F + V_{FB} \quad (9)$$

A partir das equaes apresentadas  possível projetar o gráfico dos regimes de operao do transistor MOSFET com valores superiores a V_T que utilizam a I_{DS} em funo da V_{DS} com a aplicao de diversos valores de tensão na porta do transistor, como apresentado na Figura 5. A partir desta figura  possível comparar a influência da corrente no canal do transistor quando se altera o tipo de material dielétrico ou sua espessura, normalmente, a I_{DS} diminuir para espessuras maiores e aumentar para espessuras menores. Mas  necessário que tenha cuidado na escolha da espessura do dielétrico, caso seja muito pequeno, poderá provocar uma ruptura dielétrica, onde ocasiona a perda das propriedades isolantes do material [6,7,9].

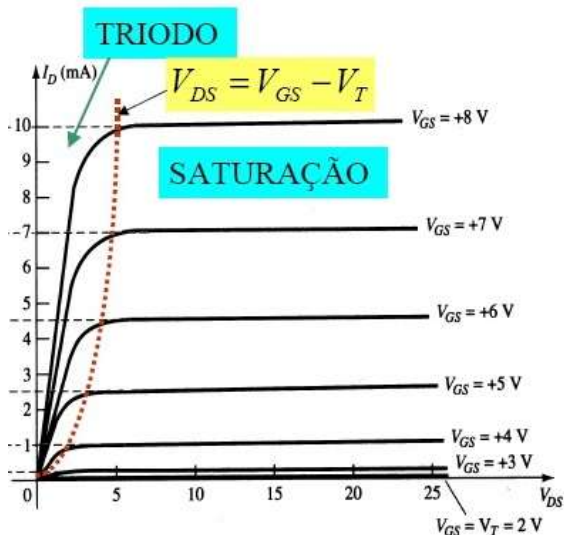


Figura 5 – Curva $I_{DS} \times V_{DS}$ [9].

Os cálculos necessários para projeção dos regimes de operação de corte, triodo e saturação do transistor MOSFET do tipo P e N é visto adiante.

NMOSFET

Região de corte:

$$V_{GS} < V_T \text{ ou } V_{GS} - V_T < 0$$

$$I_{DS} = 0$$

Região de Triodo:

$$0 < V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$$

$$I_{DS} = \beta_N \cdot [(V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}]$$

Região de Saturação:

$$0 < V_{GS} - V_T \leq V_{DS}$$

$$I_{DS} = \beta_N \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2}$$

Ganho do transistor β_N :

$$\beta_N = \frac{\mu_N \cdot \epsilon_{ox}}{T_{ox}} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)$$

PMOSFET

Região de corte:

$$V_{GS} > V_T \text{ ou } V_{GS} - V_T > 0$$

$$I_{DS} = 0$$

Região de Triodo:

$$V_{GS} - V_T \leq V_{DS} < 0$$

$$I_{DS} = \beta_P \cdot [(V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}]$$

Região de Saturação:

$$V_{DS} \leq V_{GS} - V_T < 0$$

$$I_{DS} = \beta_P \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2}$$

Ganho do transistor β_P :

$$\beta_N = \frac{\mu_P \cdot \epsilon_{ox}}{T_{ox}} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)$$

Porém, utilizando as equações 12 ou 16 dos regimes de operação dos transistores citados anteriormente, a região de saturação da Figura 5 não possui o comportamento descrito no gráfico, pois na prática temos um pequeno ganho de corrente de dreno após a saturação do transistor, que acontece devido à diminuição da região de inversão forte após o pinçamento da camada. Visto que, para um cálculo mais aproximado do real, é necessário considerar a modulação efetiva do comprimento do canal, obtendo o comportamento mostrado na Figura 6 [10].

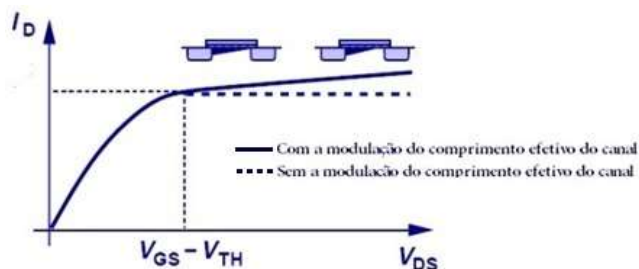


Figura 6 – Efeito da modulação na curva característica do MOSFET [10].

Para que a corrente de saturação tenha o comportamento correspondente a Figura 6, é necessário adicionar a seguinte expressão:

$$1 + \lambda \cdot V_{DS} \quad (18)$$

Onde $\lambda = \frac{1}{V_A}$ e V_A corresponde à tensão de Early que possui valores típicos entre 50 a 100 V [10,11]. Adicionando essa expressão nas equações 10 e 14, obtemos duas novas equações.

Região de Saturação: Tipo N

$$I_{DS} = \beta_N \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2} \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) \quad (19)$$

Região de Saturação: Tipo P

$$I_{DS} = \beta_P \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2} \cdot (1 - \lambda \cdot V_{DS}) \quad (20)$$

Na Figura 7 é possível notar que o efeito de modulação do comprimento efetivo do canal tem maiores efeitos em transistores de canal curto, onde geram valores maiores de corrente de dreno na região de saturação [12].

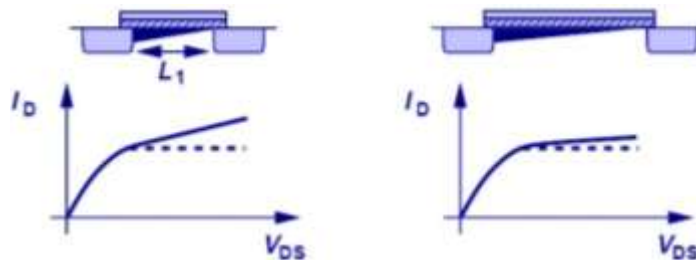


Figura 7 – Comparação do efeito da modulação do comprimento efetivo do canal em diferente comprimento de porta [10].

Buscando apresentar as influências dos nanotubos de carbono nos transistores MOSFET é necessário estudar a forma de extração dos parâmetros dos nanotubos, que nada mais é que uma camada de grafeno enrolada e fechada, onde é determinado o vetor quiral (\vec{C}_h), mostrando o sentido de rotação do nanotubo, cuja origem parte de um átomo da monocamada do grafeno. A expressão do vetor quiral é $\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \equiv (n, m)$ onde n e m são valores inteiros e devem satisfazer a seguinte relação: $0 \leq |m| \leq |n|$. O vetor translacional \vec{T} delimita o comprimento do nanotubo cuja origem é perpendicular ao vetor \vec{C}_h . A expressão do vetor translacional é $\vec{T} = T_1\vec{a}_1 + T_2\vec{a}_2 \equiv (T_1, T_2)$ onde T_1 e T_2 são valores inteiros. Os vetores \vec{a}_1 e \vec{a}_2 definem os pontos de localização dos carbonos na rede cristalina, onde possuem valores constantes $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = 0,249$ nm. Esses pontos são necessários para classificar a orientação do nanotubo como quiral ou aquiral, conforme apresentado na Figura 8(b) [3,4].

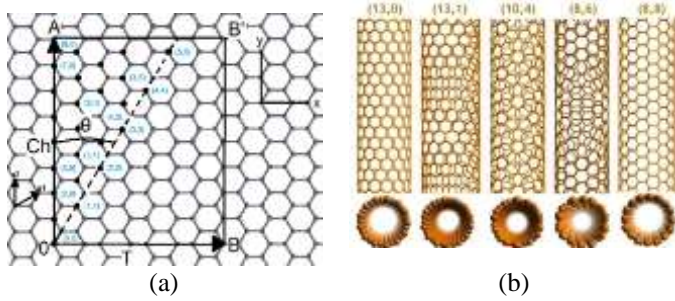


Figura 8 - (a) Monocamada de grafeno com respectivos vetores. (b) Nanotubos de diferentes quiralidades [3].

O diâmetro do nanotubo – d – é dado pela Equação 21:

$$d = \frac{L}{\pi} = \frac{a \cdot \sqrt{m^2 + n^2 + nm}}{\pi} \quad (21)$$

Onde L é o perímetro e $a = 2,49 \text{ \AA} = 24,9 \text{ nm}$. O ângulo θ define como o nanotubo será classificado, para $\theta = 0^\circ$ teremos um nanotubo zigzag e, para $\theta = 30^\circ$, o nanotubo será armchar. Os valores de T_1 e T_2 são adquiridos a partir das seguintes expressões:

$$T_1 = \frac{2 \cdot m + n}{d_R} \quad (22) \quad T_2 = -\frac{2 \cdot n + m}{d_R} \quad (23)$$

O comprimento do vetor \vec{T} é dado pela expressão 24:

$$T = |\vec{T}| = \sqrt{3} \frac{L}{d_R} \quad (24)$$

Onde d_R é o resultado do máximo divisor comum de $(2 \cdot m + n)$ e $(2 \cdot n + m)$ [3,4]. Os transistores MOSFET que utilizam nanotubo de carbono em sua construção, são chamados de *carbon nanotube field effect transistor* (ou apenas CNFET) que são constituídos de duas variações estruturais, plana e

coaxial como apresentado na Figura 9.

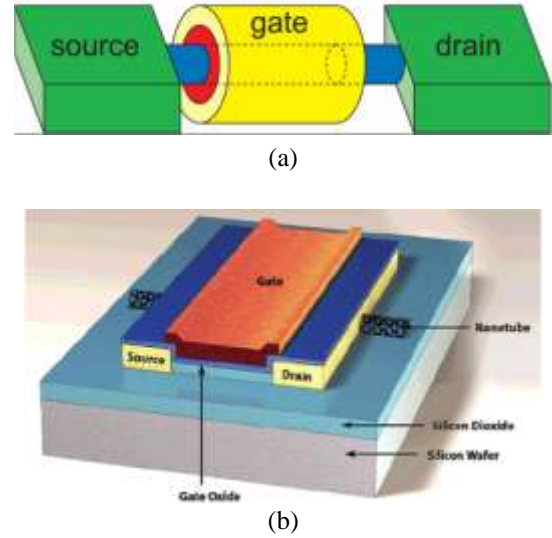


Figura 9 – Variação estrutural dos CNFET: (a) coaxial (b) planar [13].

Ambas as estruturas da Figura 9 possuem o mesmo comportamento de funcionamento, porém diferente dos MOSFETs do tipo enriquecimento apresentados até agora. Tais estruturas se assemelham com os MOSFETs do tipo depleção apresentado na Figura 10 onde a única diferença entre as estruturas são o material correspondente ao canal.

Nos MOSFETs do tipo depleção são utilizados os mesmos materiais das regiões de fonte e dreno, enquanto no CNFET é utilizado o nanotubo de carbono. Uma mudança que ocorre devido à alteração da estrutura do tipo enriquecimento para o tipo depleção é que o valor do limiar de transição passa a ser negativo como apresentado na Figura 11(a) em comparação com a Figura 11(b).

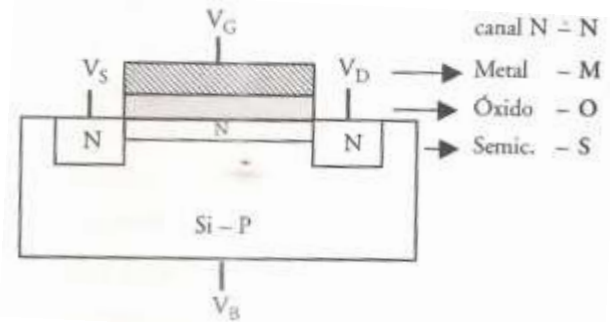


Figura 10 – Transistor MOSFET do tipo depleção [6].

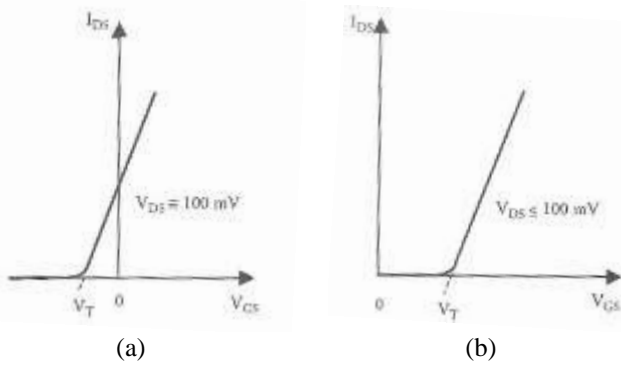


Figura 11 – Limiar de Transição do MOSFET do tipo depleção (a) em comparação com o MOSFET do tipo enriquecimento (b) [6].

Em posse destes valores é possível calcular a velocidade de saturação dos transistores, utilizando a equação 25.

$$v_{sat} = \mu_N \cdot E \quad (25)$$

Onde μ_N é a mobilidade dos elétrons, sendo que este valor no silício corresponde a $S_i = 1500 \frac{cm^2}{V.s}$, e no nanotubo de carbono $C_n = 7900 \frac{cm^2}{V.s}$, e E é o campo elétrico entre fonte e dreno, expresso pela equação (26).

$$E = \frac{V_{ds}}{L} \quad (26)$$

III. METODOLOGIA

A ferramenta utilizada na modelagem do parâmetro da tensão de limiar e das características do nanotubo de carbono será desenvolvida utilizando a (IDE) do Visual Studio. Programado na linguagem de programação C#, se tratar de uma linguagem orientada a objeto executada no .NET Framework que contém todas as classes necessárias para o funcionamento da aplicação no sistema operacional Windows. Os parâmetros calculados foram utilizados para elaboração das curvas características dos transistores MOSFET e CNFET, que também foram utilizados no software desenvolvido pelos alunos das universidades da *Purdue University*, *University of Florida*, *University of Illinois*, *Southern Illinois University* e *IBM* chamado de FETToy, para efeito de comparação e caracterização das mudanças elétricas nos transistores. O programa desenvolvido para modelagem do parâmetro da tensão de limiar e das características dos transistores contendo nanotubo de carbono, assim que iniciado, apresenta uma tela com duas opções de cálculos como apresentado na Figura 12.

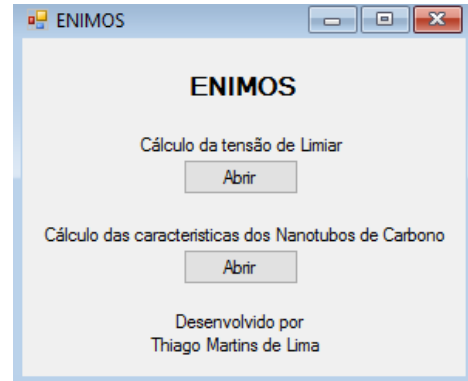


Figura 12 – Tela Inicial ENIMOS.

Dando escolha ao usuário entre calcular a tensão de limiar e as características físicas do nanotubo. Caso escolha a primeira opção o programa apresentará a seguinte tela (Figura 13).



Figura 13 – Tela de cálculo da tensão de limiar.

Por meio desta tela o usuário adicionará as propriedades necessárias dos materiais de acordo com as características do projeto do transistor MOSFET, assim, o programa calculará os valores de cada campo preenchido e adicionará automaticamente o resultado onde for necessário até que todos os campos referentes à tensão de limiar sejam totalmente preenchidos gerando o valor necessário para plotagem do gráfico do transistor MOSFET. Caso o usuário escolha a segunda opção, o programa ENIMOS apresentará uma tela conforme Figura 14.

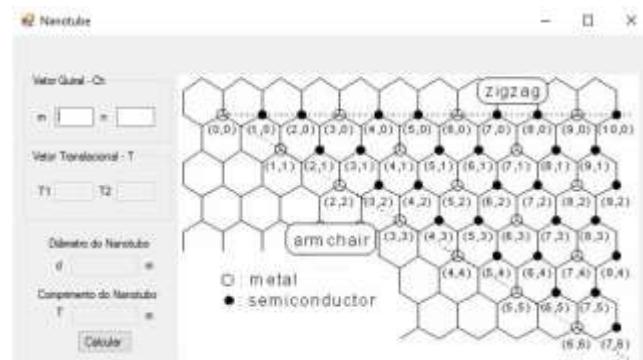


Figura 14 – Tela de modelagem dos parâmetros do nanotubo.

Assim como a tela anterior, o software calculará muitos campos automaticamente, apresentando o resultado do vetor translacional, diâmetro do nanotubo e comprimento, baseado nos pontos adicionados ao vetor quiral, de acordo com a propriedade desejada do nanotubo. Em posse do valor de V_T , e das características do nanotubo, outras informações relacionadas às características dos materiais de construção do MOSFET que foram utilizados na determinação da V_T inicial, serão utilizados no programa FETToy, conforme apresentado na Figura 15.



(a)



(b)

Figura 15 – Tela do programa FETToy [14].

As características utilizadas no programa ENIMOS para obtenção da tensão de limiar, tensão de faixa plana, entre outros parâmetros são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais característicos da região do capacitor MOS.

Capacitor MOS		
ϵ_{ox}	HfO_2	SiO_2
T_{ox}	$1\mu; 100n; 10n$	$1\mu; 100n; 10n$
N_a	$10 \cdot 10^{17} cm^{-2}$	$10 \cdot 10^{17} cm^{-2}$
Φ_M	$Au - 4,8$	$Au - 4,8$
Φ_S	$Si - 4,7$	$Si - 4,7$
ϵ_{Si}	$1,06 \cdot 10^{-12} F/cm^2$	$1,06 \cdot 10^{-12} F/cm^2$
n_i	$10 \cdot 10^{10} cm^{-3}$	$10 \cdot 10^{10} cm^{-3}$

$$\underline{Q_{SS}/q} \quad 1,6 \cdot 10^{10} cm^{-2} \quad 1 \cdot 10^{12} cm^{-2}$$

A princípio, para efeito de comparação entre mesmas estruturas, serão utilizados dois tipos de materiais isolantes distintos, o SiO_2 e HfO_2 aplicados em três diferentes espessuras de $1\mu m$, $100nm$ e $10nm$. O valor utilizado para obtenção do diâmetro e comprimento do nanotubo de carbono a partir do vetor quiral na tela de modelagem das características do nanotubo será baseado no comprimento de porta padronizado do programa FETToy que é $100nm$, com isso o valor referente ao vetor quiral será (4,2). Por fim, os valores adicionados no programa FETToy são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Materiais característicos do Transistor MOSFET e CNFET.

MOSFET - Tipo N			CNFET - Tipo N		
ϵ_{ox}	HfO_2	SiO_2	ϵ_{ox}	HfO_2	SiO_2
T_{ox}	$1\mu; 100n; 10n$		T_{ox}	$1\mu; 100n; 10n$	
V_{DS}	$2V$	$2V$	V_{DS}	$2V$	$2V$
V_G	$0,25V; 0,5V;$ $0,75V; 1V$		V_G	$0,25V; 0,5V;$ $0,75V; 1V$	
V_T	Calculado		V_T	Calculado	

IV. RESULTADOS

Os resultados de tensão limiar, tensão de banda plana, capacitância, entre outros parâmetros obtidos a partir do ENIMOS são apresentados na Tabela 3 e 4.

Analisando os primeiros resultados é possível verificar que, quanto menor a espessura do óxido, maior será a capacitância, conseqüentemente menor será o valor da tensão de limiar. Os valores utilizados no programa FETToy, para a plotagem do gráfico da curva característica do MOSFET (Figura 16), são os valores da Tabela 2 mais os valores da coluna de espessura de $10nm$ do SiO_2 e HfO_2 da Tabela 3 e 4, respectivamente, cujo resultados são próximos.

Tabela 3 – Resultado das características do capacitor MOS usando SiO_2 como isolante de porta.

Capacitor MOS - Tipo N			
T_{ox}	1μ	$100n$	$10n$
ϵ_{ox}	SiO_2	SiO_2	SiO_2
$V_T (V)$	1,88	0,641	0,517
$V_{fb} (V)$	-0,396	-0,312	-0,304
$C_{ox} (F/cm^2)$	$3,45 \cdot 10^{-7}$	$3,45 \cdot 10^{-6}$	$3,45 \cdot 10^{-5}$
$\Phi_{MS} (V)$	-0,303	-0,303	-0,303

Tabela 4 – Resultado das características do capacitor MOS usando SiO_2 como isolante de porta.

Capacitor MOS - Tipo N			
T_{ox}	1μ	$100n$	$10n$
ϵ_{ox}	HfO_2	HfO_2	HfO_2
$V_T (V)$	0,66	0,519	0,505
$V_{fb} (V)$	-0,375	-0,31	-0,304
$C_{ox} (F/cm^2)$	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-4}$

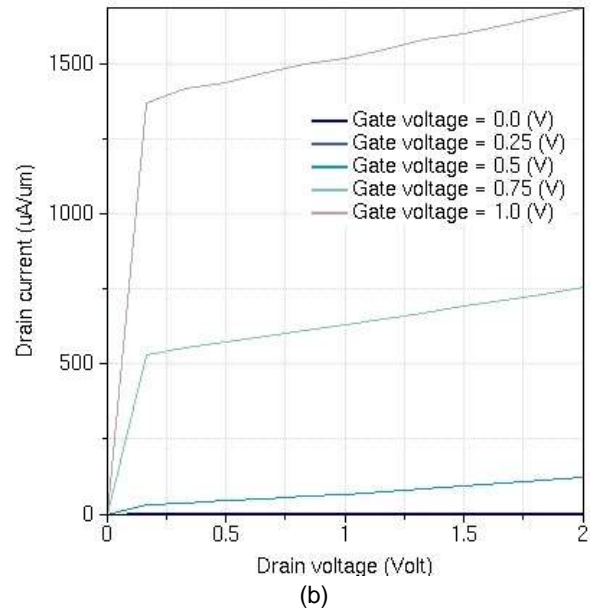
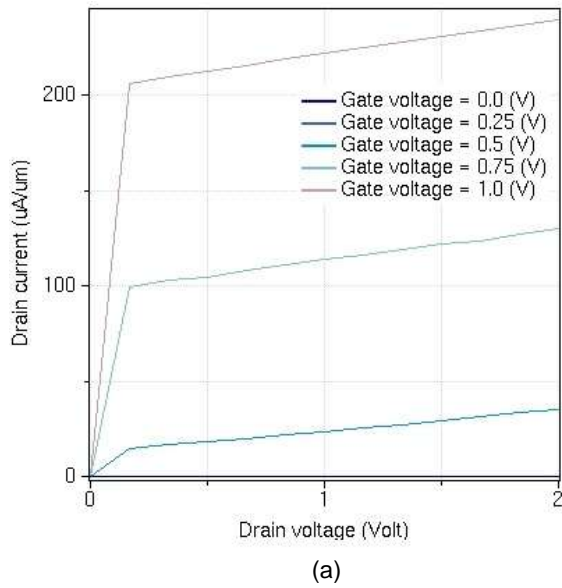


Figura 16 – (a) Curva $I_{DS} \times V_{DS}$ com SiO_2 e (b) Curva $I_{DS} \times V_{DS}$ com HfO_2 .

Os resultados referentes ao diâmetro e comprimento do nanotubo de carbono obtidos a partir do vetor quiral de (8,4) foram $d = 83,9$ nm e $T = 114$ nm. Os parâmetros de caracterização do CNFET foram os mesmos do MOSFET mantendo um padrão de comparação (Figura 17).

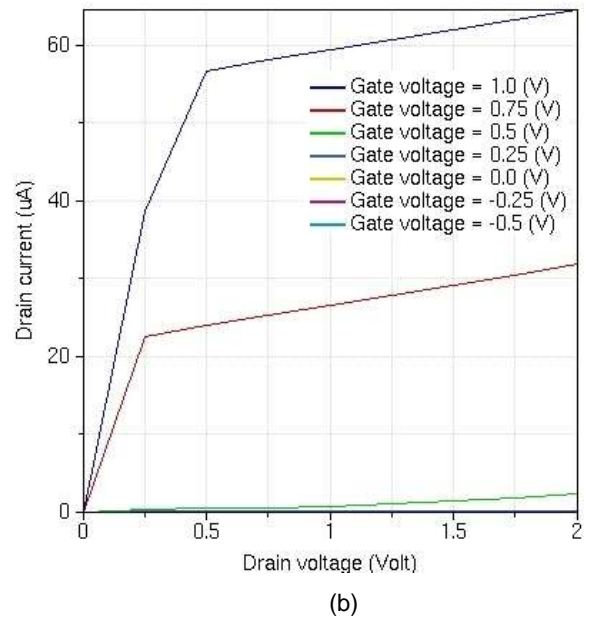
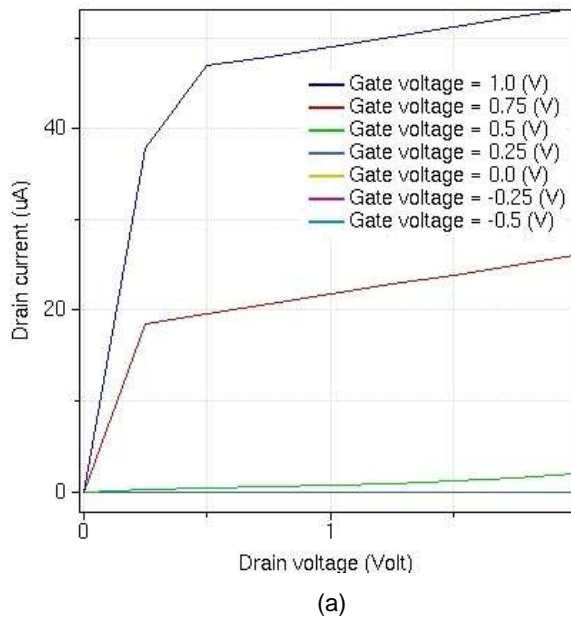


Figura 17 – (a) Curva $I_{DS} \times V_{DS}$ com SiO_2 e (b) curva $I_{DS} \times V_{DS}$ com HfO_2 .

Mesmo os transistores possuindo valores de tensão limiar próximos, o transistor com o HfO_2 permitiu a passagem de uma corrente superior comparado ao de silício como apresentado nas Figuras 16 e 17. Isso ocorre devido ao maior valor da constante dielétrica do material, contribuindo com o controle das cargas capacitivas na região da porta do transistor, mesmo que as cargas efetivas da interface

metal/semicondutor do HfO_2 sejam maiores.

Utilizando a equação (24) para calcular e comparar as velocidades de saturação dos transistores MOSFET e CNFET, utilizando como dielétrico o HfO_2 na porta do transistor, largura de canal de 10 nm e os valores de limiar de saturação $V_{DS} \cong 0,2$ V para MOSFET e $V_{DS} \cong 0,5$ V para CNFET, obtemos os seguintes resultados:

$$v_{sat}(MOSFET) = 3 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$$

$$v_{sat}(CNFET) = 39,5 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$$

Analisando os valores de velocidade de saturação, nota-se que o transistor CNFET é mais rápido que o MOSFET tradicional, apesar de necessitar de uma diferença de potencial maior entre fonte e dreno. Outra vantagem seria a possibilidade de fabricar processadores de baixo consumo, já que transistores baseados no CNFET trabalhariam com menores níveis de corrente, conforme visto na Figura 17, quando comparado ao MOSFET tradicional (Figura 16) para um mesmo nível de tensão de porta ($V_{GS} = 1 \text{ V}$).

V. CONCLUSÃO

Notou-se que os transistores contendo nanotubo de carbono (CNFET) possuem um baixo valor de corrente de operação, mas uma alta velocidade de saturação, o que contribui para a sua aplicação, visto que os processadores trabalham com um baixo valor de corrente e tensão, mas uma alta velocidade de processamento. Embora os transistores CNFET tenham um enorme potencial para substituir os transistores MOSFET, sua fabricação em escala industrial ainda é inviável e cara, principalmente devido aos métodos de fabricação dos nanotubos de carbono serem lentos e provocarem defeitos na estrutura do transistor. Maiores avanços nessa área são necessários para tornarem essa tecnologia viável economicamente.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] LIU, G. *et. al.* **Graphene Based Non-Boolean Logic Circuits**. California, 2013. Department of Electrical Engineering, University of California.
- [2] INTEL Corporation. **Intel's 22 Nanometer Technology Moves the Transistor into the 3rd Dimension**. Santa Clara, CA. 2013.
- [3] FONSECA, A. F. **Minicurso: Introdução às propriedades físicas e estruturais do grafeno e dos nanotubos de carbono**. Departamento de Física – UFF. 2011.
- [4] PADILHA, J. E. **Vacâncias em nanotubos de carbono: Propriedades Eletrônicas, Estruturais e de Transporte**. São Paulo, 2008. Instituto de Física, Universidade de São Paulo.
- [5] INTEL Corporation. **14nm Process Technology: Opening New Horizon**. 2014.
- [6] MARTINO, J. A.; PAVANELLA, M. A.; VERDONCK, P. B. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS**. São Paulo: Thomson, 2003.
- [7] WART, J. W. **Capacitor M.O.S (Metal – Óxido – Semicondutor)**. Unicamp.
- [8] HU, C. **Capacitor MOS**. Berkeley Electrical Engineering and Computer Sciences. 2009.
- [9] BARIATTO, M. **Transistores nMOS: Curvas Características**. Material didático do Curso superior de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos – MPCE, Disciplina: Dispositivos Semicondutores II. Faculdade de tecnologia de São Paulo – FATEC. Disponível em: <<http://www.lsi.usp.br/~bariatto/fatec/ds2/>>. Acesso em 20 de março de 2017
- [10] RAZAVI, B. **Fundamentals of Microelectronics: Chapter 6 – Physics of MOS transistors**. 2. ed. Wiley, 2013. In: **Fundamentals of Microelectronics Lecture**. Prof. Murat Torlak. Disponível em: <<https://www.utdallas.edu/~torlak/courses/ee3311/lectures/ch06updated.pdf>>. Acesso em 30 de março de 2017.

- [11] SEDRA, A. S.. **Microeletrônica**. Pearson, 5. ed. 2007.
- [12] SALEH, R. **Lecture 6: Leakage and low power design**. Dept. of ECE. University of British Columbia, 2009.
- [13] HIEN, D. S. **Modeling of Carbon Nanotube Field Effect transistors**. HCM City University of Natural Sciences. 2011.
- [14] RAHMAN, A. *et. al.* **FETToy**. Disponível em: <<https://nanohub.org/resources/fettoy/>>. Acesso em 15 de maio de 2017.