

MARCO ANTONIO CONTI CARLOTTI FILHO

**ESTUDO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE RESÍDUOS DE CÁLCIO E
DE DETERGENTE ALCALINO PARA OTIMIZAR AS ETAPAS DE
PRÉ-LAVAGEM E DE ENXÁGÜE EM UM TROCADOR DE CALOR DE
PLACAS**

SÃO CAETANO DO SUL

2008

MARCO ANTONIO CONTI CARLOTTI FILHO

**ESTUDO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE RESÍDUOS DE CÁLCIO E
DE DETERGENTE ALCALINO PARA OTIMIZAR AS ETAPAS DE
PRÉ-LAVAGEM E DE ENXÁGÜE EM UM TROCADOR DE CALOR DE
PLACAS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de Pesquisa: Análise e otimização de processos industriais

Orientador: Prof. Dr. Leo Kunigk

SÃO CAETANO DO SUL

2008

DEDICATÓRIA

Aos meus pais **Marco** e **Lourdes** pelo exemplo
de amor e vida a mim oferecido.

Ao meu irmão **Rodrigo**, tia **Tânia** e vó **Libinha** por
sempre estarem presentes na minha vida.

A **Lucília**, minha companheira, meu amor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. **Leo Kunigk**, pela paciência e dedicação demonstradas ao decorrer do trabalho.

À **Fundação Salvador Arena** pela disponibilização de suas instalações físicas durante o desenvolvimento dos procedimentos práticos.

Aos meus amigos de trabalho e irmãos da **TUC** por me permitir fazer parte de suas vidas

RESUMO

Os procedimentos envolvidos no processo de higienização de equipamentos, muitas vezes, baseiam-se no empirismo, acarretando desperdícios para a indústria. Dessa forma, este trabalho visou a determinação da cinética de remoção de resíduos de cálcio na pré-lavagem e de detergente alcalino pela água de enxágüe em trocador de calor de placas. No primeiro modelamento variou-se a vazão volumétrica da água, enquanto no segundo também sua temperatura. Amostras foram retiradas com o decorrer dos processos e analisadas por métodos titulométricos. Através dos modelos matemáticos obtidos verificou-se que a velocidade de remoção dos agentes estudados eleva-se com o aumento da vazão; porém, no caso da remoção de cálcio, incrementos desmedidos neste parâmetro podem ocasionar ganhos poucos significativos no processo. A remoção de detergente alcalino não apresentou variação significativa com a temperatura da água. Em todos os testes realizados verificou-se a existência de um tempo máximo útil de escoamento, que, se superado, não apresentará variações importantes nos índices de remoção dos agentes estudados.

Palavras-chave: Higienização. Detergente. Remoção de cálcio. Cinética. Trocador de calor de placas.

ABSTRACT

The procedures involved in the process of cleaning equipment, often based on empiricism, causing waste to the industry. Thus, this work aimed to determine the kinetics of calcium removal of waste in pre-washing and alkaline detergent through water in the plate exchange. In the first modeling ranged up the volume of water flow, while the second shall also its temperature. Samples were withdrawn over the course of proceedings and analyzed by titration methods. Through mathematical models obtained it was found that the rate of removal of agents studied adds up with the increased flow, but in case of removal of calcium, disproportionate increases in this parameter may cause few significant gains in the process. The removal of alkaline detergent presented no significant variation with the water temperature. In all tests it was found that there is a maximum time of useful outlets, which will not overcome significant variations in the rates of removal of agents studied.

Keywords: Higienização. Detergent. Removal of calcium. Kinetics. Plate exchange.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS.....	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. HIGIENIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS – ASPECTOS GERAIS	15
2.1.1. Importância de um processo de higienização	15
2.1.2. Fatores importantes na deposição de resíduos em um trocador de calor ..	16
2.1.3. Biofilme.....	20
2.2. DEFINIÇÕES IMPORTANTES	21
2.3. PROCESSO DE HIGIENIZAÇÃO	21
2.4. CUSTO	23
2.5. ETAPAS DA HIGIENIZAÇÃO.....	24
2.5.1. Pré-lavagem.....	24
2.5.2. Aplicação de soluções de detergentes.....	25
2.5.2.1. Detergentes alcalinos.....	29
2.5.2.2. Detergentes ácidos	31
2.5.3. Enxágüe.....	31
2.5.4. Sanitização	32
2.5.5. Enxágüe.....	34
2.6. TROCADOR DE CALOR DE PLACAS	34
2.6.1. Características da higienização de um trocador de placas	35
2.7. SISTEMAS DE HIGIENIZAÇÃO	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1. DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE RESÍDUOS DE LEITE NA ETAPA DE PRÉ- LAVAGEM	42

3.2. DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE DETERGENTE ALCALINO	44
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	46
4.1. DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE RESÍDUOS DE LEITE NA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM	46
4.2. DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE DETERGENTE ALCALINO	53
4.2.1. Influência da vazão de água na remoção de detergente alcalino	53
4.2.2. Influência da temperatura da água na remoção de detergente alcalino	58
5. CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - TROCADOR DE CALOR DE PLACAS UTILIZADO NOS ENSAIOS.....	41
FIGURA 2 - SETOR DE AQUECIMENTO DO TROCADOR DE CALOR DE PLACAS. NO DESTAQUE ENCONTRA-SE A VÁLVULA AUTOMÁTICA DE CONTROLE DE ENTRADA DE ÁGUA QUENTE.....	41
FIGURA 3 - TROCADOR DE CALOR DE PLACAS. NO DESTAQUE RESSALTA-SE A VÁLVULA MANUAL DE RETIRADA DE AMOTRAS.....	42
QUADRO 1 - QUADRO SINÓPTICO EXPLICATIVO DO FUNCIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR UTILIZADO.....	42
GRÁFICO 1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ENXÁGÜE, NAS VAZÕES TESTADAS, NA CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE CÁLCIO NA ÁGUA DE ENXÁGÜE NA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS UTILIZADO PARA PASTEURIZAR LEITE RECONSTITUÍDO.....	47
GRÁFICO 2 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ENXÁGÜE NA CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE CÁLCIO, PRESENTES NA ÁGUA DE ENXÁGÜE DA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM, DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS UTILIZADO PARA PASTEURIZAR LEITE RECONSTITUÍDO. A VAZÃO EMPREGADA DE ÁGUA, NESTE PROCESSO, FOI DE 10 L.h ⁻¹	48
GRÁFICO 3 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ENXÁGÜE NA CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE CÁLCIO, PRESENTES NA ÁGUA DE ENXÁGÜE DA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM, DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS UTILIZADO PARA PASTEURIZAR LEITE RECONSTITUÍDO. A VAZÃO EMPREGADA DE ÁGUA, NESTE PROCESSO, FOI DE 15 L.h ⁻¹	48
GRÁFICO 4 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ENXÁGÜE NA CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE CÁLCIO, PRESENTES NA ÁGUA DE ENXÁGÜE DA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM, DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS UTILIZADO PARA PASTEURIZAR LEITE RECONSTITUÍDO. A VAZÃO EMPREGADA DE ÁGUA, NESTE PROCESSO, FOI DE 20 L.h ⁻¹	49

GRÁFICO 5 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ENXÁGÜE NA CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE CÁLCIO, PRESENTES NA ÁGUA DE ENXÁGÜE DA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM, DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS UTILIZADO PARA PASTEURIZAR LEITE RECONSTITUÍDO. A VAZÃO EMPREGADA DE ÁGUA, NESTE PROCESSO, FOI DE 30 L.h ⁻¹	49
GRÁFICO 6 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ENXÁGÜE NA CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE CÁLCIO, PRESENTES NA ÁGUA DE ENXÁGÜE DA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM, DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS UTILIZADO PARA PASTEURIZAR LEITE RECONSTITUÍDO. A VAZÃO EMPREGADA DE ÁGUA, NESTE PROCESSO, FOI DE 40 L.h ⁻¹	50
GRÁFICO 7 - VARIAÇÃO DAS CONSTANTES DE VELOCIDADE, OBTIDAS DAS EQUAÇÕES DE REMOÇÃO DE SAIS DE CÁLCIO PELA ÁGUA DE PRÉ-LAVAGEM, COM A VAZÃO DE ESCOAMENTO.....	52
GRÁFICO 8 - VARIAÇÃO DE β EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENXÁGÜE UTILIZANDO COMO PARÂMETROS DE ESCOAMENTO PARA A ÁGUA: VAZÃO DE 10L/h E TEMPERATURA MÉDIA DE 50°C.....	54
GRÁFICO 9 - VARIAÇÃO DE β EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENXÁGÜE UTILIZANDO COMO PARÂMETROS DE ESCOAMENTO PARA A ÁGUA: VAZÃO DE 15L/h E TEMPERATURA MÉDIA DE 50°C.....	55
GRÁFICO 10 - VARIAÇÃO DE β EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENXÁGÜE UTILIZANDO COMO PARÂMETROS DE ESCOAMENTO PARA A ÁGUA: VAZÃO DE 20L/h E TEMPERATURA MÉDIA DE 50°C.....	55
GRÁFICO 11 - VARIAÇÃO DE β EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENXÁGÜE UTILIZANDO COMO PARÂMETROS DE ESCOAMENTO PARA A ÁGUA: VAZÃO DE 40L/h E TEMPERATURA MÉDIA DE 50°C.....	56
GRÁFICO 12 - β_{MAX} POSSÍVEL DE SER OBTIDO, NO PROCESSO DE ENXÁGÜE PARA REMOÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO DAS SUPERFÍCIES DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS, EM FUNÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA A TEMPERATURA CONSTANTE DE 50°C.....	58
GRÁFICO 13 - VARIAÇÃO DE β EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENXÁGÜE UTILIZANDO COMO PARÂMETROS DE ESCOAMENTO PARA A ÁGUA: VAZÃO DE 20L/h E TEMPERATURA MÉDIA DE 25°C.....	59

GRÁFICO 14 - VARIACÃO DE β EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENXÁGÜE UTILIZANDO COMO PARÂMETROS DE ESCOAMENTO PARA A ÁGUA: VAZÃO DE 20L/h E TEMPERATURA MÉDIA DE 45°C.....	60
GRÁFICO 15 - VARIACÃO DE β EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENXÁGÜE UTILIZANDO COMO PARÂMETROS DE ESCOAMENTO PARA A ÁGUA: VAZÃO DE 20L/h E TEMPERATURA MÉDIA DE 50°C.....	60
GRÁFICO 16 - VARIACÃO DE β EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENXÁGÜE UTILIZANDO COMO PARÂMETROS DE ESCOAMENTO PARA A ÁGUA: VAZÃO DE 20L/h E TEMPERATURA MÉDIA DE 65°C.....	61
GRÁFICO 17 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VARIACÃO DA CONCENTRAÇÃO DE NaOH NA ÁGUA DE ENXÁGÜE A VAZÃO DE 20 L/h.....	62
GRÁFICO 18 - β_{MAX} POSSÍVEL DE SER OBTIDO, NO PROCESSO DE ENXÁGÜE PARA REMOÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO DAS SUPERFÍCIES DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA A VAZÃO CONSTANTE DE 20L/h.....	63

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1 - PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS QUE REPRESENTAM A CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE CÁLCIO NA ÁGUA DE ENXÁGÜE, UTILIZADA EM DIFERENTES VAZÕES DE ESCOAMENTO, NA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS APÓS PASTEURIZAÇÃO DE LEITE RECONSTITUÍDO.....51
- TABELA 2 - VALORES DAS CONSTANTES α_1 , α_2 E α_3 DA EQUAÇÃO OBTIDA PELA MODELAGEM DO PROCESSO DE REMOÇÃO DE DETERGENTE ALCALINO, ASSIM COMO OS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES EM FUNÇÃO DA VAZÃO DA ÁGUA DE ENXÁGÜE.....57
- TABELA 3 - VALORES DAS CONSTANTES α_1 , α_2 E α_3 DA EQUAÇÃO OBTIDA PELA MODELAGEM DO PROCESSO DE REMOÇÃO DE DETERGENTE ALCALINO, ASSIM COMO OS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE ENXÁGÜE MANTENDO-SE CONSTANTE A VAZÃO EM 20 L/h.....61

1. INTRODUÇÃO

O contato dos alimentos com superfícies mal higienizadas pode aumentar a incidência de microrganismos prejudicando sua qualidade. A presença de resíduos também ocasiona problemas operacionais nos equipamentos, pois acarreta queda dos rendimentos nas trocas térmicas e aumento de perda de carga do sistema. Esses fatores são suficientes para justificar a importância da execução de um correto plano de higienização dos insumos utilizados no processamento de alimentos.

Por serem procedimentos que requerem paradas de produção, os processos de higienização, muitas vezes, são realizados de forma negligenciada pelas empresas. Portanto, é de fundamental importância que sejam estudados e otimizados, através do estabelecimento das cinéticas de remoção de resíduos de cada etapa do processo.

O estabelecimento do tempo adequado ao processo de higienização é fundamental para a eficiência do processo. Deve ser suficientemente longo para que as reações químicas e as interações físicas ocorram a contento; mas não deve ser excessivo, pois reduziria a produtividade da indústria.

Um processo de higienização é composto pelas seguintes etapas: pré-lavagem, ação de detergentes, enxágüe e sanitização. As etapas estudadas serão a pré-lavagem e o enxágüe. A primeira consiste na ação de água sobre os resíduos para que estes sejam parcialmente removidos da superfície dos equipamentos; somente os mais fracamente aderidos são retirados nesta etapa do processo. O enxágüe, também se caracteriza pela passagem de água no equipamento, porém com função precípua de remoção do detergente químico utilizado.

Dois parâmetros envolvidos nestes processos foram objetos de análise neste trabalho: vazão de escoamento e temperatura. O primeiro está relacionado com a ação cisalhante proporcionada pela água sobre a superfície, enquanto o segundo permite melhor solubilização dos resíduos, facilitando sua remoção.

O equipamento utilizado neste trabalho foi um trocador de calor de placas, muito utilizado na indústria de derivados de leite, porém de difícil higienização, pois as temperaturas envolvidas durante seu funcionamento acarretam, entre outros, desnaturação protéica que dificulta a retirada dos resíduos, obrigando a realização de paradas mais freqüentes.

O sistema de higienização adotado mais comumente em um trocador de calor de placas é o CIP (*Clean in Place*). Este método propicia maior rapidez ao processo por não haver necessidade de realização de desmonte do equipamento.

Em um processo CIP, o tempo de escoamento das soluções, em cada etapa do processo de higienização, é o parâmetro de maior facilidade de manipulação e, por isso, o fator preferido de redução. Porém, se alterado de forma não criteriosa pode ocasionar a não efetividade do processo.

A prática de higienização de equipamentos pela indústria de alimentos baseia-se em experiências empíricas, deixando o setor à mercê de informações provenientes dos fornecedores de detergentes e sanitizantes. Parâmetros semi-empíricos são adotados a partir de resultados finais de higienização considerados satisfatórios. A complexidade dos fenômenos existentes nas reações de remoção requer o aumento de trabalhos científicos que possam contribuir com os procedimentos adotados industrialmente.

Melhorar os resultados de um processo requer a otimização de cada etapa individualmente. Portanto, este trabalho procurará determinar a cinética de remoção de resíduos em duas etapas do processo de higienização de um trocador de calor de placas utilizado na pasteurização de leite: pré-enxágüe através da avaliação da variação da concentração de cálcio, ao longo do tempo, na água utilizada nesta fase; e no enxágüe, através da análise da variação da alcalinidade, ao longo do tempo, da água empregada para remoção do detergente alcalino.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HIGIENIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS – ASPECTOS GERAIS

2.1.1. Importância de um processo de higienização

As condições higiênico-sanitárias de um alimento, que garantem sua palatabilidade, qualidade e segurança, estão intimamente ligadas com o processo de higienização das instalações em que foi processado. Superfícies de equipamentos ou utensílios, que entram em contato com alimentos durante o processo de industrialização, podem provocar contaminação ou aumento da incidência de microrganismos (ANDRADE; MACEDO, 1996).

Os microrganismos, presentes na matéria-prima processada, aderem aos resíduos sólidos surgidos após a passagem da mesma em um equipamento (REINEMANN; RABOTSKI, 1993). Portanto, a higienização adequada de um equipamento é fundamental para a remoção dessas sujidades. De acordo com Bansal e Chen (2005) um trocador de calor utilizado na indústria de laticínios deve ser higienizado diariamente para manter seus padrões de qualidade.

A presença de resíduos não só propicia condições para a proliferação de microrganismos, como também afeta as condições de operação dos trocadores de calor, pois reduz as taxas de transferência de calor provocando um sub-processamento do produto, devido às temperaturas necessárias para a realização dos tratamentos térmicos, como pasteurização e esterilização, não serem atingidas, propiciando-lhe condições para o desenvolvimento de uma microbiota deteriorativa e/ou patogênica durante seu armazenamento. A presença de resíduos sobre as superfícies também aumenta os níveis de queda de pressão no equipamento por aumentar a rugosidade superficial (BANSAL; CHEN, 2005; FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006).

Higienizar adequadamente o equipamento pode reverter em benefícios econômicos ao setor industrial. De acordo com Garrett (1985 apud JUN; PURI, 2005) custos gerados, pelos resíduos incrustados, estão envolvidos nas paradas de produção para manutenção e reparo dos equipamentos, na perda de produção, no excessivo uso de água e na perda de energia.

Gillham (2000 apud BANSAL; CHEN, 2005) e Fryer, Christian e Liu (2006) citam também os custos envolvidos com a utilização de produtos químicos e com o impacto ambiental. A regularidade de procedimentos de higienização pela empresa diminui os problemas acima mencionados. A principal preocupação dos efluentes do ponto de vista ambiental relacionada ao processo de higienização é o pH das soluções. Quando soluções fortemente alcalinas são utilizadas, recomenda-se neutralizá-las, após sua utilização, para que seu pH diminua e somente então descartá-las (SCHMIDT, 1997).

De acordo com Beuf et al. (2003) a indústria leiteira holandesa gasta mais de US\$ 40 milhões com problemas gerados pela formação de resíduos. Para Asselt et al. (2005 apud BANSAL; CHEN, 2006), mais de 80% dos custos envolvidos nos processos das indústrias de derivados lácteos estão relacionados aos processos de higienização de equipamentos.

O entendimento e a conseqüente otimização de um processo de higienização permite a redução dos custos envolvidos neste processo (JEURNINK; BRINKMAN, 1994). Para otimizar um processo de higienização é necessário o entendimento de como são gerados os resíduos e aplicar esses conhecimentos nas tomadas de decisões efetivas para sua remoção.

2.1.2. Fatores importantes na deposição de resíduos em um trocador de calor

Os fatores que interferem na deposição dos resíduos são enumerados por Bansal e Chen (2005). Segundo esses autores, a composição do leite e as condições de operação e características do trocador de calor são fatores interferentes desse processo.

O leite é um produto de complexa composição química. Em média sua composição é de 87,5% de água, 13% de gordura, 3,9% de lactose, 3,4% de proteínas (subdivididas em 2,6% de caseína, 0,32% de β -lactoglobulina, 0,12% de α -lactalbumina), 0,8% de minerais e pequenas quantidades de outras substâncias (BYLUND, 1995 apud BANSAL; CHEN, 2005). Um aumento no teor de proteínas resulta em maior quantidade de incrustações (TOYODA, 1994 apud BANSAL; CHEN, 2005).

A quantidade de cálcio também interfere no teor de resíduos formados, pois contribui para a diminuição da temperatura de desnaturação da β -lactoglobulina (CHANGANI, 1997 apud BANSAL; CHEN, 2005). Sua presença será aumentada quanto menor for o pH do leite, provavelmente por, nestas condições, ocorrer sua remoção da estrutura da caseína (LEWIS; HEPPELL, 2000 apud BANSAL; CHEN, 2006).

Por sua vez, o leite reconstituído apresenta menor formação de resíduos, pois 25% da β -lactoglobulina é desnaturada durante o processo de fabricação de leite em pó. Contribui, também, para essa diminuição, a redução de 9% no teor de cálcio (CHANGANI, 1997 apud BANSAL; CHEN, 2005).

Dentre as condições de operação do trocador de calor que facilitam a formação de incrustações estão a presença de ar, o regime de escoamento do fluido, a temperatura de processo, as características de superfície de troca térmica, a composição da água de aquecimento do sistema e o uso adequado de agentes químicos durante o processo de higienização.

A presença de bolhas de ar, formadas no interior do trocador de calor, facilita a deposição de resíduos, pois elas agem como núcleos de deposição (de JONG 1997, apud BANSAL; CHEN, 2005). A turbulência de escoamento do fluido dentro do trocador diminui a taxa de formação de resíduos para Belmar-Beiny (1993 apud BANSAL; CHEN, 2005). Contudo, DELPLACE et al (1997 apud BANSAL; CHEN, 2006) não verificou significativa alteração na formação de resíduos com a turbulência empregada. A temperatura da superfície do trocador de calor é o fator operacional de maior influência na formação de resíduos. Segundo Chen e Bala (1998 apud BANSAL; CHEN, 2005) aumento da temperatura de processo resulta em aumento de resíduos.

As características da superfície de troca térmica somente são importantes até a mesma ser coberta pelos resíduos. De acordo com Middlemiss et al. (1985) forças de Van der Waals promovem a interação superfície-resíduo. Para Nessauer e Kessler (1985 apud GRANT; WEBB; JEON, 1997), forças eletrostáticas atuam na ligação entre a superfície e proteínas globulares com grupos hidrofílicos, ao passo que as forças de Van der Waals são as principais ligações entre a superfície e as proteínas desnaturadas do soro de leite. Estudos realizados revelam que, no leite, as ligações adesivas, entre proteínas e superfície, são mais fortes que as ligações coesivas entre os elementos dos resíduos; portanto necessitam de maior energia para remoção (FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006).

Fatores que afetam a deposição de resíduos no aço inoxidável são: presença de óxido de cromo, carga superficial, energia superficial, microestrutura superficial (rugosidade e outras irregularidades), presença de sítios ativos, presença de material residual de outros processamentos, e a liga do aço inoxidável utilizado (JEURNINK 1996 apud BANSAL; CHEN, 2005). Diversos estudos realizados nas superfícies, como coberturas ou eletropolimentos, para minimização da formação de resíduos ou aumento na eficiência do processo de higienização são relatados por Fryer, Christian e Liu (2006) e Bansal e Chen (2006). A presença de rugosidade na superfície aumenta a área superficial resultando em uma maior deposição de resíduos, pois fornece âncoras de sustentação para grandes proteínas agregadas (BANSAL; CHEN, 2006 e GRANT; WEBB; JEON, 1997).

A utilização de água dura¹ é apontada por Turner, (1982) como causadora de formação de resíduos minerais. O simples aquecimento ou alcalinização desta água, para a sanitização da superfície e adequação da mesma às temperaturas de operação, provoca a precipitação dos sais nela contidos, que originará rugosidades na superfície, onde se depositarão proteínas, gorduras e microrganismos.

¹ Água que possui sais de cálcio, magnésio e ferro (REED, 1992).

O uso de agentes químicos incorretos pode propiciar rachaduras, rugosidade ou corrosão na superfície do trocador de calor. Dessa forma, é necessária a correta escolha dos agentes a serem empregados no processo de higienização (SCHMIDT, 1997).

Uma vez conhecidas as condições causadoras da deposição dos resíduos, o entendimento de como são formados é importante para justificativa dos procedimentos adotados em um processo de higienização.

Apesar de ainda existirem diversas dúvidas com relação à formação dos depósitos de leite em trocador de calor de placas acredita-se que ela ocorre com o desenvolvimento das seguintes etapas (BELMER-BEINY; FRYER 1993 apud BANSAL; CHEN, 2005; JUN; PURI, 2005):

- a) desnaturação e agregação de proteínas no leite;
- b) deposição da proteína agregada para a superfície do equipamento;
- c) ocorrência de reações químicas na superfície resultando na incorporação dos resíduos;
- d) possível troca ou movimentação de compostos.

Apesar de constituir somente 10% das proteínas do leite, pelo menos 50% das proteínas presentes no resíduo de leite, formados em trocadores de calor que trabalha entre 70°C e 80°C, são β -lactoglobulina (FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006). Portanto, a desnaturação da proteína β -lactoglobulina parece ser o fator principal para a formação das incrustações em trocadores de calor principalmente quando o processo ocorre a temperaturas inferiores a 90°C (BANSAL; CHEN, 2005; JUN; PURI, 2005). De acordo com Fryer e Belmer-Beiny (1991 apud BANSAL; CHEN, 2005) o início da desnaturação dessa proteína inicia-se em temperaturas entre 70°C e 74°C.

Ao desnaturar a β -lactoglobulina seu núcleo é exposto. Este, por sua vez, contém grupos sulfidrilo reativos. Dessa forma, a proteína reage com outros grupos similares tais como caseína, α -lactalbumina e origina agregados. Por serem de tamanho elevado esses agregados apresentam dificuldade de movimentação (BANSAL; CHEN, 2005; FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006). Essa situação justifica a afirmação de Changani (1997 apud BANSAL; CHEN, 2005) de que a formação de resíduos só ocorrerá se a agregação se der próxima à superfície de troca térmica. De acordo com os mesmos autores, proteínas adsorvidas na superfície do trocador de calor, unem-se às proteínas agregadas através dos íons cálcio presentes no leite.

O segundo fator de maior contribuição para a formação de incrustação é a presença de íons cálcio e fosfato no leite. Em temperaturas superiores a 75°C, grandes agregados de β -lactoglobulina são formados na presença de cálcio, devido à precipitação do último (JUN; PURI, 2005; FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006). Fosfatos de cálcio, presentes no meio, contribuem para o avanço da formação de resíduos por criar ligações “carboxiladas” entre proteínas agregadas e minerais precipitados. A precipitação dos sais ocorre pelo fato de o leite apresentar alto grau de supersaturação dos mesmos (GRANT; WEBB; JEON, 1997).

O tempo de indução para ocorrência da formação de resíduos é variado para trocadores de calor do tipo tubo e carcaça, podendo transitar na faixa de 1 a 60 min (JONG, 1997 apud BANSAL; CHEN, 2005).

Já para trocadores de placas, devido à turbulência aplicada ao fluido, esse tempo é muito curto, ou quase instantâneo (BELMER-BEINY, 1993 apud BANSAL; CHEN, 2005). O principal motivo apontado é a presença de zonas de mais baixa velocidade do fluido nas regiões de contato das placas adjacentes.

Quanto mais tempo o leite circular no trocador de calor, mais resíduo estará firmemente aderido à superfície do equipamento (MIDDLEMISS et al., 1985). É importante observar, porém, que, na formação de resíduos, existe um intervalo de tempo, denominado período de indução, no qual não se verifica nenhuma modificação no coeficiente de transferência de calor ou na queda de pressão (FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006).

A formação de resíduos em trocadores de calor acontece inevitavelmente, pelo simples fato de a desnaturação e agregação de proteínas ocorrerem assim que o leite sofre aquecimento. Porém pode ser reduzida desde que adequadas condições térmicas e hidráulicas de processamento sejam utilizadas, como aumento na taxa de escoamento e diminuição das temperaturas de processo (BANSAL; CHEN, 2006). Esses autores discordam de Lalande, Tissier e Corrieu (1984). Para os últimos, a taxa de escoamento tem pouco efeito na formação de resíduos; enquanto que os fatores mais importantes são a temperatura de tratamento do leite e a diferença de temperatura entre o mesmo e o fluido de aquecimento.

2.1.3. Biofilme

A formação de resíduos em um equipamento propicia a adesão de microrganismos por fornecer substrato aos mesmos (BANSAL; CHEN, 2005). Os microrganismos, que não foram retirados por um ineficiente processo de higienização, podem se depositar, aderir, ou interagir com os resíduos e as superfícies. Ao se instalarem, passam a se multiplicar, formar colônias e agregar nutrientes e resíduos. Dessa forma, uma estrutura denominada biofilme instala-se no equipamento, que além de tornar-se fonte de contaminantes microbianos, pode diminuir a transferência de calor, desencadear processos corrosivos e diminuir o fluxo de produtos em tubulações (ANDRADE; MACEDO, 1996; MITTELMAN, 1998).

De acordo com (BOTT 1993 apud BANSAL; CHEN, 2005) a fixação de microrganismos na superfície de um trocador de calor pode-se dar diretamente sobre o material do equipamento ou sobre a camada de depósito formada durante os processamentos. Gaxetas, presentes em trocadores de calor, apresentam condições favoráveis ao desenvolvimento de biofilme, devido à sua difícil higienização (HONER, 1992; WONG, 1998).

Conforme Mittelman (1998), durante as operações em indústrias de processamento de alimentos, os biofilmes são difíceis de serem reconhecidos e eliminados. Por mecanismos próprios, tal qual a formação de biopolímero extracelular (EPS) excretado que age como barreira à difusão de agentes sanitizantes, os microrganismos presentes nessa estrutura são capazes de resistir à ação de bactericidas. Estudos relatados por Mittelman (1998) mostram uma redução 100 vezes menor da população de *Listeria monocytogenes* quando estas estão instaladas em biofilmes.

A presença do biofilme provoca a contaminação do alimento por microrganismos que podem gerar toxinfecções de origem alimentar. Cerca de 200 doenças podem ser veiculadas pelos alimentos e causadas por bactérias, fungos, vírus, parasitas que podem ser evitadas através de um processo de higienização correto (ANDRADE; MACEDO, 1996). Isto é evidenciado na informação de que taxas de 5 a 10% das toxinfecções de origem alimentar, possuem como causa processos de higienização de equipamentos mal realizados (MANCINI 1992 apud KUNIGK, 1998). Além de patologias, várias espécies de microrganismos podem gerar processos deteriorativos nos alimentos. Esta situação gera perdas econômicas pela diminuição da confiança do consumidor na imagem da empresa (ANDRADE; MACEDO, 1996).

Prevenir a instalação de um biofilme é a chave para seu controle, portanto, a higienização deve ser feita freqüentemente com a aplicação de tratamentos combinados e com uma monitoração constante das superfícies (MITTELMAN, 1998).

De acordo com Giese (1991), a aplicação de um correto programa de higienização não é somente responsável por uma produção segura, livre de perigos microbiológicos ou químicos, mas também deve ser entendida como de interesse para a saúde pública.

2.2. DEFINIÇÕES IMPORTANTES

Antes de descrever o processo de higienização de superfícies em contato com alimentos é importante diferenciar as suas duas principais etapas: limpeza e sanitização.

De acordo com Schmidt (1997), limpeza é a remoção total de resíduos sólidos presentes nas superfícies através da utilização de detergentes químicos. Sanitização é definida como a redução da população microbiana até níveis considerados seguros para a saúde pública. Um processo eficiente de sanitização caracteriza-se, segundo a *Association of Analytical Communities* (AOAC), por reduzir a população microbiana, presente em uma suspensão, em 5 ciclos logarítmicos por 30 segundos.

A sanitização pode ser realizada de maneira térmica, através utilização de água quente ou vapor, ou química, pela ação de agentes sanitizantes químicos como hipoclorito de sódio, ácido peracético, cloretos de benzalcônio entre outros (SCHMIDT, 1997; REED, 1992).

2.3. PROCESSO DE HIGIENIZAÇÃO

Através de todas as informações citadas acima parece evidente a necessidade de um correto programa de higienização de equipamentos pelas empresas processadoras de alimentos, a fim de se retirar as sujidades decorrentes do sistema produtivo. De acordo com Honer (1992) “se a higienização não for correta, a produção não será correta”.

O objetivo da higienização de superfícies é a remoção de nutrientes que possam favorecer o desenvolvimento de bactérias e a eliminação das mesmas (SCHMIDT, 1997).

Para alcançar tais objetivos, um processo de higienização deve ser elaborado a partir das características específicas dos resíduos presentes no equipamento e dos recursos disponíveis para removê-los.

A primeira característica é, como já relatado, a composição do resíduo. A primeira fonte de formação dos resíduos sólidos nos equipamentos é o próprio alimento que está sendo processado. Vale lembrar que também contribuem para essas formações, os minerais presentes na água utilizada no processo de higienização e a presença de biofilmes. Dessa forma, a composição dos resíduos sólidos varia extensamente, caracterizando-se pela presença de componentes dos alimentos e sais de águas duras (SCHMIDT, 1997).

O entendimento de como a sujeira encontra-se aderida à superfície de um equipamento é um outro passo importante para se estruturar um eficiente processo de higienização. A sujeira pode estar aderida à superfície de quatro maneiras distintas: mecanicamente aprisionada em espaços vazios existentes; através da ação de forças de coesão; unida por ação química ou pela presença de forças adsortivas (KUNIGK, 1998). Sua deposição sobre uma superfície é um processo espontâneo, resultando em uma aparente queda de energia livre do sistema (energia livre de Gibbs). Então para realizar a limpeza da superfície, ou seja, reverter a situação, é necessário fornecer energia mecânica ou físico-química ao sistema (JENNINGS apud PASSOS, 1992).

Corroboram com o descrito no parágrafo acima Andrade e Macedo (1996) e Reinemann e Rabotski (1993). De acordo com esses autores, um eficiente processo de higienização é conseguido com a otimização dos quatro principais fatores envolvidos neste processo: energias química, mecânica e física e o tempo de contato dos produtos utilizados com as superfícies a serem higienizadas.

A energia química é utilizada no momento da realização das reações que ocorrem durante o processo, como saponificação de gordura e peptização de proteínas por agentes alcalinos; solubilização de resíduos minerais por agentes ácidos e diminuição da carga microbiológica pela ação de agentes sanitizantes. As reações sobre os resíduos reduzem suas forças de adesão à superfície (ANDRADE; MACEDO, 1996; GIBSON et al.; 1999).

Energia mecânica será utilizada para estabelecer o contato entre os resíduos e os microrganismos com os agentes de higienização. Pode ser empregada de forma manual ou pela circulação de soluções no interior de tubulações e equipamentos fechados como a utilizada em sistemas *Cleaning In Place* (CIP) onde a tensão de cisalhamento, aplicada pelo fluxo dos agentes de higienização em um equipamento, promove a remoção de resíduos (JEURNINK; BRINKMAN, 1994; ANDRADE; MACEDO, 1996; GIBSON et al.; 1999).

A energia térmica facilita o processo de higienização. Temperaturas mais elevadas podem aumentar a eficiência do processo, pois os efeitos químicos no processo aumentam linearmente com a temperatura. Porém limitações são verificadas, na utilização deste fator, em função do processo de limpeza e o tipo de resíduo que deverá ser removido (ANDRADE; MACEDO, 1996; GIBSON et al.; 1999).

O estabelecimento do tempo adequado ao processo de limpeza e sanitização é fundamental para a eficiência do processo. Deve ser suficientemente longo para que as reações químicas ocorram a contento. Porém é importante observar que as reações químicas de higienização ocorrem com maior eficiência nos minutos iniciais de contato. Tempos excessivos diminuem a produtividade da indústria, pois elevam seus custos, principalmente devido à parada de produção e elevação do volume de efluentes que precisará ser tratado posteriormente (ANDRADE; MACEDO, 1996).

2.4. CUSTO

A implantação de um correto processo de higienização reverte em custos para a indústria, justificando o porquê de muitas vezes ser realizado de forma negligenciada. Rebello (1988 apud JUN; PURI 2005) relatou que na década de 80 o custo estimado anual com o processo de higienização pelas indústrias norte-americanas encontrava-se entre US\$ 4 e 7 bilhões. Destes, 23,9% se deviam à água utilizada e 7,5%, aos agentes de limpeza. Sandu e Singh (1991 apud GRANT; WEBB; JEON, 1997) estimam em US\$ 20 milhões o custo anual com agentes de limpeza na indústria leiteira. Para Pritchard et al (1988 apud GRANT; WEBB; JEON, 1997) 42% do tempo disponível nesse setor são destinados a processos de higienização.

O grande desafio da higienização moderna é aumentar sua efetividade e diminuir seus custos. Parâmetros envolvidos no processo como temperaturas, concentrações e volume de soluções devem ser reduzidos tanto quanto for possível. Custo energético está envolvido na elevação e manutenção das temperaturas das soluções (MROZEK, 1985).

A água utilizada nas diferentes etapas do processo é um fator importante a ser considerado. Reduzir a quantidade água proporciona economia em três frentes: minimização do custo da própria água, de energia para aquecimento e de reagentes químicos para preparo das soluções, além de evitar gastos excessivos com o tratamento de efluentes (MROZEK, 1985). Também é importante salientar que a utilização de água dura acarreta elevação dos custos do processo, pois aumenta o consumo de detergentes (GIESE, 1991).

O estabelecimento da cinética de remoção de resíduos pode otimizar a realização de operações de higienização e construção de trocadores de calor, resultando em redução dos custos operacionais desse equipamentos na ordem pelo menos 50% (JONG, 1997 apud, JUN; PURI 2005). De acordo com JEURNINK; BRINKMAN (1994), a otimização dos procedimentos de higienização reduzem seus custos energéticos em taxas de até 50%. Por sua vez os custos com agentes de higienização são reduzidos em 25% e o nível de perdas de produtos apresenta uma redução de 5%.

2.5. ETAPAS DA HIGIENIZAÇÃO

Um processo de higienização adequado estabelece um procedimento padrão composto pelas seguintes etapas (SCHMIDT, 1997; ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; GIESE, 1991):

2.5.1. Pré-lavagem

Etapa em que só é utilizada água. Visa reduzir a quantidade de resíduos presentes na superfície dos equipamentos. Remove os compostos mais fracamente aderidos. Cerca de 90% dos resíduos solúveis em água podem vir a ser removidos nesta fase do processo de higienização (ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006).

A facilidade com a qual o resíduo será removido da superfície é função da sua solubilidade. Dessa forma são classificados de acordo com esse quesito em (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975):

- Solúveis em água: açúcares, alguns tipos de amidos, maioria dos sais;
- Solúveis em ácidos: maioria dos depósitos minerais;
- Solúveis em álcalis: proteínas, emulsões gordurosas;
- Solúveis em água, álcali ou ácido.

É importante que se analise também a condição em que se encontra o resíduo para verificar se o mesmo está seco, fresco, esponjoso ou cozido (REED, 1992).

A temperatura adequada da água deve estar na faixa de 38°C a 46°C, pois temperaturas superiores podem provocar desnaturação de proteínas, que facilita a aderência desses compostos à superfície dos equipamentos; temperaturas mais baixas podem ocasionar a solidificação de gorduras, que prejudica a eficiência da limpeza (LEITÃO, 1975). Por outro lado estudos realizados por Middlemiss et al. (1985) demonstraram que o nível de remoção de resíduos com água a 20°C apresentou resultados similares aos obtidos temperatura de 40°C. De acordo com o autor, a remoção de resíduos neste caso é basicamente um processo físico de separação dos substratos mais fracamente aderidos.

De acordo com Middlemiss et al. (1985) estudos realizados por outros pesquisadores revelam um aumento na formação de pedras de leite quando a temperatura da água nesta etapa era igual ou superior a 49°C.

O tempo da pré-lavagem deve ser cuidadosamente estimado. Se for intensamente reduzido resultará em altos níveis de resíduos remanescentes na superfície, o que redundará em rápido esgotamento dos detergentes. Se for superestimado provocará a geração de um volume grande de efluentes cujos tratamentos tornar-se-ão mais custosos (TURNER, 1982).

2.5.2. Aplicação de soluções de detergentes

Etapa realizada para a remoção da sujidade mais aderida à superfície que não foi removida na etapa anterior (PASSOS, 1992). Aplica-se uma solução de detergente, que é definido como toda substância que, sozinha ou misturada, reduz o trabalho necessário para realizar um processo de limpeza (BOURNE; JENNINGS apud PASSOS, 1992).

A correta realização da etapa de limpeza com detergentes permite que a etapa de sanitização se realize de forma adequada, pois a maioria dos sanitizantes reage com matéria orgânica provocando, dessa forma, redução na sua eficiência (HOBBS; ROBERTS, 1997). Além do efeito sobre os resíduos, os detergentes atuam diretamente sobre a população microbiana em uma superfície. Estudos realizados por Gibson et al. (1999) demonstraram a redução em 1 ciclo logaritmo da população de microrganismos localizados em superfície de aço inoxidável. Os mesmos autores mencionam estudos anteriores no qual a redução alcançada nesta etapa foi de aproximadamente 3 ciclos logaritmos.

O detergente entra em contato com a sujidade aderida no equipamento, separando-a e o dispersando-a no solvente (no caso a água), com o intuito de prevenir nova deposição. Para realizar essa tarefa, a concentração da solução, a temperatura de aplicação e o tempo de contato com o resíduo devem ser definidos de acordo com as condições de trabalho existentes (ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975).

Para a correta aplicação das soluções de detergentes, alguns parâmetros operacionais devem ser observados. A temperatura de utilização é de suma importância para sua eficácia. Isso se deve à natureza essencialmente física de sua ação (MIDDLEMISS et al., 1985).

Soluções de detergente com temperaturas elevadas possibilitam acelerar o processo de remoção de resíduos, por diminuir as forças de ligação entre os resíduos e a superfície, e aumentar tanto a velocidade das reações como a solubilidade de compostos solúveis. Concomitantemente, acarreta, também, diminuição da viscosidade dos fluidos, o que remete a uma maior turbulência no escoamento e conseqüente maior ação mecânica na limpeza, condição essa fundamental para uma elevação na eficiência em sistemas de limpeza automáticos (FORSYTHE; HAYES, 2002; LEITÃO, 1975).

A fusão das gorduras, que ocorre a temperaturas superiores a 35-37°C, faz com que a utilização de temperaturas mais elevadas também propicie uma maior eficácia na ação do detergente nessas condições (MIDDLEMISS et al, 1985). Entretanto é importante observar que cada detergente tem sua temperatura ótima de ação que deve ser monitorada durante o processo de aplicação. A velocidade de remoção de sujidade aumenta, em média, 1,5 vezes a cada 10°C de aumento da temperatura. Porém temperaturas superiores à faixa de 43°C a 54°C dificilmente são utilizadas, pois podem provocar a desnaturação protéica, efeito este que dificulta a sua remoção (KUNIGK, 1998; LEITÃO, 1975).

Outro parâmetro operacional que deve ser observado é o tempo de contato entre sujidades e as soluções de detergente. Existem tempos mínimos e ótimos de ação (ANDRADE; MACEDO, 1996). Estudos realizados mostram que o tempo de contato pode ser reduzido com a utilização de maiores concentrações de detergente ou se for aplicado mais força (KUNIGK, 1998). É importante salientar que tempos mínimos devem ser adequadamente avaliados para garantir uma adequada ação dos componentes químicos (FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006).

O uso da correta concentração dos detergentes em solução é citado por Parkar, Flint e Brooks (2003). Estudos realizados por esses autores demonstraram que ao diminuir a concentração dos agentes de limpeza pela metade, houve morte das células semelhantes às alcançada com a concentração original. Porém houve ineficiência na remoção de todas as células e resíduos da superfície. Para Marshall (1994 apud PARKAR, FLINT, BROOKS, 2003) os resíduos proporcionados pelas células mortas tornam-se locais aptos para a instalação de novas células ou materiais orgânicos, resultando numa formação mais rápida de biofilme posteriormente.

Porém outros estudos mencionados por Fryer, Christian e Liu (2006) demonstram que um aumento não criterioso na concentração de detergente pode ocasionar maior dificuldade na remoção de sujidades. De acordo com Gallot-Lavallee; Lalande e Corrieu, (1984) isso ocorre devido à dificuldade que o detergente tem em penetrar no resíduo, proporcionada pelo aumento da viscosidade da solução.

Além dos três fatores citados anteriormente (tempo de contato, temperatura e concentração do detergente), a remoção de sujidades de um equipamento deve contar com ação mecânica, que decompõe a sujidade e colabora na sua remoção das superfícies (ANDRADE; MACEDO, 1996).

A energia mecânica é aplicada através de fricção, na qual forças de cisalhamento atuam sobre a superfície do equipamento. As forças de cisalhamento atuarão de forma mais intensas, quanto maior for a taxa de escoamento; porém, limites ao fluxo devem ser observados, pois podem ocasionar gastos excessivos no sistema de bombeamento e desgaste das superfícies por abrasão (REED, 1992; FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006). A velocidade mínima dimensionada para uma correta higienização em trocador de calor de placas é de 3m/s (KUNIGK, 1998).

Outro parâmetro utilizado para dimensionar a energia mecânica aplicada no processo de higienização é o número de Reynolds. Estudos realizados por Gallot-Lavallee, Lalande e Corrieu (1984) determinam que qualquer aumento na taxa de escoamento, resultando em valores de Reynolds entre 10000 e 70000, implica em aumento na eficácia do processo de limpeza.

O fato de todos os parâmetros operacionais serem bem executados não remeterá em um adequado processo de higienização se o detergente utilizado não for o apropriado para a remoção de um determinado tipo de resíduo. Por isso é importante o conhecimento da composição do detergente que será utilizado.

Os detergentes contêm, em sua formulação, diversos compostos químicos que agem sobre os resíduos de diferentes maneiras. Estes podem ser divididos em (SCHMIDT, 1997):

- Compostos fisicamente ativos, que alteram a solubilidade e a estabilidade coloidal do resíduo;
- Compostos quimicamente ativos, que modificam os componentes dos resíduos tornando-os mais solúveis e, conseqüentemente, mais fáceis de serem removidos.

Dentre os componentes fisicamente ativos estão os surfactantes (tensoativos) que possuem em sua estrutura uma porção hidrofílica e outra hidrofóbica. Agem emulsionando², penetrando, dispersando³ e umidificando⁴ os resíduos (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975; REED, 1992).

Dentre os componentes quimicamente ativos podem ser citados agentes seqüestran-tes⁵, como tripolifosfato de sódio, organo-fosfatos e EDTA, que formam complexos solúveis com cálcio e magnésio que gerariam depósitos minerais (SCHMIDT, 1997; TURNER, 1982; REED, 1992; GIESE, 1991).

Nenhuma substância simples possui todas essas propriedades. Então, para cada necessidade de operação de higienização, são realizadas formulações específicas que atendam às demandas do processo (GIESE, 1991).

Os ingredientes quimicamente ativos mais importantes subdividem os detergentes utilizados nas limpezas que utilizam o sistema CIP em duas classes: alcalinos e ácidos (SCHMIDT, 1997).

² “Reação com óleo e gordura, transformando-os em pequenas partículas que permanecem em suspensão coloidal na solução de detergente” (LEITÃO, 1975, p. 8). A emulsão evita a aglomeração das partículas que permanecem em suspensão por um longo período de tempo (REED, 1992).

³ “Propriedade que caracteriza a desagregação de agregados de resíduos em minúsculas partículas individuais, as quais são facilmente suspensas e removidas dos equipamentos” (LEITÃO, 1975, p. 7; REED, 1992).

⁴ “Propriedade de reduzir a tensão superficial do meio aquoso, de forma a aumentar sua capacidade de penetração em resíduos” (LEITÃO, 1975, p. 8).

⁵ “Propriedade de evitar a deposição de sais minerais indesejáveis nas superfícies em limpeza, usualmente pela formação de quelatos” (LEITÃO, 1975, p. 9). Quelatos são complexos solúveis e estáveis, com uma típica estrutura de anel (REED, 1992).

2.5.2.1. Detergentes alcalinos

As soluções alcalinas⁶ são utilizadas, por serem eficientes na remoção de gorduras, proteínas, carboidratos e na diminuição da carga microbiana (ANDRADE; MACEDO, 1996; SCHMIDT, 1997; JEURNINK; BRINKMAN, 1994; GIESE, 1991).

Em gorduras os detergentes alcalinos agem através da ação emulsificante ou de saponificante⁷ de seus ingredientes (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975). Em proteínas, agem principalmente através da quebra de sua estrutura em porções menores (peptização) ou por solubilização (MIDDLEMISS et al., 1985).

Na remoção de gorduras, tempos menores de processo podem ser mais efetivos que longos tempos, pois neste último caso pode haver coalescência e redeposição (MIDDLEMISS et al., 1985).

Por sua vez, as proteínas encontradas na indústria de alimentos caracterizam-se por serem os resíduos sólidos de maior dificuldade para remoção. Como comprovação cita-se o fato de que a caseína (principal proteína do leite) é utilizada por suas propriedades adesivas em colas e tintas. Quando desnaturadas, as proteínas apresentam maior nível de dificuldade em sua remoção, necessitando que os detergentes alcalinos tenham em sua formulação agentes peptizantes⁸ ou dissolvedores⁹ (SCHMIDT, 1997).

As camadas formadoras dos resíduos são removidas em ordem inversa a sua deposição (MIDDLEMISS et al, 1985). De acordo com Grasshoff (1988 apud Jeurnink e Brinkman, 1994) o processo de remoção de resíduos de leite se dá por um prévio inchamento das camadas superiores após contato com detergente alcalino, seguido de sua remoção. O inchamento é justificado pela quebra de algumas ligações entre os resíduos ou de um aumento na repulsão entre as moléculas componentes, causado pelo elevado pH da solução alcalina. Rachaduras surgem nas estruturas, facilitando ainda mais a penetração do agente de limpeza (JEURNINK; BRINKMAN, 1994). As camadas remanescentes, constituídas principalmente por minerais, são removidas pela ação de detergente ácido que deverá ser adicionado posteriormente.

⁶ Alcalinos são agentes químicos que em solução liberam íons hidroxila, propiciando pH superior a 7,0.

⁷ “Propriedade do detergente de reagir com gorduras, causando sua saponificação, ou seja, transformação em sabões, que são removidos” (LEITÃO, 1975, p. 9). A reação básica é: gordura + NaOH = sabão + glicerol (REED, 1992).

⁸ “Propriedade de reagir e dispersar proteínas, havendo formação de soluções coloidais, parcialmente solúveis” (LEITÃO, 1975, p.8; REED, 1992).

⁹ “Ação pela qual partículas insolúveis de resíduos reagem quimicamente com os agentes de limpeza, dando produtos solúveis em água” (LEITÃO, 1975, p.9). Exemplo desse fenômeno é a reação de um agente alcalino com ácido que resulta em um produto solúvel em água (REED, 1992).

Dessa maneira é importante conhecer esses dois tipos de detergente para que sua utilização seja otimizada. Os detergentes alcalinos são classificados em (SCHMIDT, 1997; REED, 1992):

- Detergente de alta alcalinidade¹⁰: NaOH ou KOH. Apresentam grande capacidade de saponificar gorduras. Possuem pH superior a 13 e são utilizados para remoção de sujidades mais incrustadas, derivadas de processos nos quais elevadas temperaturas foram utilizadas (GIESE, 1991).
- Detergente de moderada alcalinidade: De acordo com Giese (1991) detergente com moderada alcalinidade apresenta soluções com valores de pH entre 10 e 12, com metassilicato de sódio entre seus componentes. Por sua vez, detergentes contendo carbonato de sódio apresentam baixa alcalinidade com pH das soluções entre 7 e 10 sendo utilizado principalmente na lavagem manual das superfícies.

O álcali mais utilizado em equipamentos como trocadores de calor e concentradores é o hidróxido de sódio que se caracteriza por ser o mais barato dos agentes alcalinos e possuir grande capacidade de remover proteínas e gorduras, além de não provocar a corrosão do aço inoxidável (ANDRADE; MACEDO, 1996; TURNER, 1982). O principal inconveniente da utilização do hidróxido de sódio (NaOH) é sua baixa molhabilidade que poderá ser melhorada com a adição de um tensoativo na composição do detergente (TURNER, 1982).

Independente de sua classificação, as soluções alcalinas devem ser utilizadas a uma temperatura superior que a do aquecimento do produto (BARNARD; IVKOVICH, CAULLER, 1992).

A concentração utilizada de detergente alcalino é dependente do resíduo a ser removido e da alcalinidade ativa do composto. A alcalinidade ativa de um composto, expressa em Na₂O, é um importante indicador do valor do detergente no processo de limpeza, pois parte dela é usada para a remoção dos resíduos, através das ações citadas anteriormente, e outra parte é utilizada para neutralização dos agentes ácidos presentes nos mesmos (LEITÃO, 1975).

É citada por Stemerding e Brinkman (1990, apud JEURNINK; BRINKMAN, 1994) a existência de detergentes alcalinos com componentes seqüestrantes em sua composição para a remoção, por estes, dos resíduos minerais, dispensando, algumas vezes, a utilização de detergentes ácidos.

¹⁰ Medida da quantidade de álcalis em uma solução (REED, 1992).

2.5.2.2. Detergentes ácidos

Os detergentes ácidos são utilizados na remoção de resíduos minerais por transformar os sais insolúveis em água em compostos solúveis (SCHMIDT, 1997; JEURNINK; BRINKMAN, 1994). Essas formulações podem conter ácidos orgânicos, como os ácidos glucônico e cítrico, ou inorgânicos, como o sulfúrico (H_2SO_4), clorídrico (HCl), fosfórico (H_3PO_4) e nítrico (HNO_3) (ANDRADE; MACEDO, 1996; SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975).

Como no caso dos detergentes alcalinos, os detergentes ácidos possuem sua concentração de utilização dependente do resíduo a ser removido, e a concentração baseada em sua acidez ativa (LEITÃO, 1975).

É de fundamental importância o conhecimento pelos operadores do processo, qual a função de cada agente utilizado e o momento de sua correta utilização. O uso inapropriado do detergente pode dificultar a remoção de resíduos. A utilização de agentes ácidos antes da completa remoção dos resíduos orgânicos, por exemplo, pode precipitar proteínas (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975). Para evitar equívocos é necessário o estabelecimento de um procedimento escrito com quantidades, produtos, tempos e temperaturas envolvidos no processo (BARNARD; IVKOVICH, CAULLER, 1992). Outro aspecto importante é a composição da água utilizada nos enxágües e no preparo das soluções. Utilizando-se água com dureza elevada, pode ocorrer a precipitação de carbonato de cálcio ou de magnésio quando a água for aquecida ou alcalinizada e, desta forma, a higienização do equipamento ficará comprometida.

2.5.3. Enxágüe

Etapa que tem por objetivo a remoção dos resíduos suspensos pela ação do detergente através da utilização de água, evitando que ocorra nova deposição durante a secagem, e eliminar as frações residuais das soluções de detergentes aplicadas anteriormente (ANDRADE; MACEDO, 1996; FRYER; CHRISTIAN; LIU, 2006).

Qualquer detergente deixado no sistema após o processo de lavagem pode contaminar o produto, alterando suas características organolépticas, devendo ser considerado como um aditivo incidental (KUNIGK, 1998).

Por ser um processo exclusivamente físico, os fatores envolvidos neste processo são vazão e temperatura da água utilizada. A vazão de escoamento interfere no cisalhamento aplicado sobre a superfície a ser higienizada, enquanto a temperatura na solubilidade dos resíduos.

2.5.4. Sanitização

Esta etapa do processo de higienização tem por objetivo a eliminação de microrganismos patogênicos e a redução do número de microrganismos deterioradores até níveis considerados seguros (ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; REED, 1992). As formas de microrganismos não patogênicos mais resistentes que sobreviverem sobre as superfícies não devem afetar a qualidade dos alimentos e dificultar sanitizações posteriores (FORSYTHE; HAYES, 2002).

Resíduos orgânicos, que por ventura não forem removidos nas etapas anteriores, além de proteger os microrganismos da ação do sanitizante, atuam como fonte de nutrientes (ANDRADE; MACEDO, 1996). De acordo com Schmidt (1997), o resíduo sólido reduz a atividade do agente sanitizante, podendo até inativá-lo. Para Giese (1991, p. 75): “Não se pode sanitizar uma superfície suja”.

Outro aspecto importante reforça a proposição de necessidade da ausência de resíduos remanescentes ao início dessa etapa. A presença de rachaduras nos resíduos pode servir de depósito de microrganismos. Como a ação do sanitizante depende do contato com o microrganismo, pode haver prejuízo na sua efetividade (SCHMIDT, 1997).

A sanitização deve ser realizada imediatamente antes do uso do equipamento, sendo importante observar que não elimina eventuais falhas de etapas anteriores (ANDRADE; MACEDO, 1996).

Pode ser realizada, como já citado, de forma térmica ou química. No primeiro caso, o calor pode ser transferido para a superfície utilizando-se vapor de água ou água quente (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975; TURNER, 1982). A atividade antimicrobiana destes métodos dependerá principalmente do binômio tempo-temperatura (GIESE, 1991).

A utilização de vapor apresenta aplicação limitada, pois gera custos mais elevados, se comparada com a utilização de água quente, e é de difícil operação, pois o tempo e temperaturas de contato são de complexos monitoramentos (SCHMIDT, 1997; TURNER, 1982). As condições de processo variam de 77°C durante 15 minutos a 93°C durante 5 minutos de contato (LEITÃO, 1975).

O sistema com utilização de água quente pode ser realizado na forma de imersão, *spray* ou circulação de água. Custo relativamente baixo, facilidade de aplicação, rápida disponibilidade do equipamento, efetividade sobre uma grande variedade de microrganismos, relativa não-corrosividade e a sanitização de rachaduras e fendas são as principais vantagens da utilização da água quente.

As desvantagens relacionadas com a utilização do calor na sanitização são: lentidão do processo, alto custo energético, contribuição para a formação de filmes de água e redução da vida útil de certos equipamentos ou parte destes como as gaxetas (SCHMIDT, 1997). Giese (1991) ressalta, ainda que alguns esporos bacterianos podem sobreviver à temperatura de ebulição por mais de uma hora e se a água utilizada for dura, pode ocorrer a precipitação de carbonatos. Para o caso de equipamentos de processamento de alimentos deve-se utilizar água a 77°C durante 5 minutos (LEITÃO, 1975).

Os sanitizantes químicos devem apresentar algumas propriedades para serem utilizados em equipamento, como: ser aprovado para aplicação em superfícies de contato com alimentos pelos órgãos governamentais competentes, possuir largo espectro de ação microbiológica, agir rapidamente sobre os microrganismos, ser estável e resistente à presença de materiais orgânicos e aos detergentes, ser rapidamente solubilizado, possuir baixo grau de corrosividade e toxicidade e apresentar baixo custo (SCHMIDT, 1997; GIESE, 1991).

A escolha de um sanitizante depende de uma análise ampla das condições envolvidas e, devido à constante modificação da resistência dos microrganismos, um sistema de rodízio de sanitizantes deve ser implantado (GIESE, 1991).

Os tipos de sanitizantes químicos mais utilizados na indústria de alimentos são aqueles à base de cloro, ácido peracético, iodo, compostos quaternários de amônio e peróxido de hidrogênio (ANDRADE; MACEDO, 1996; MITTELMAN, 1998; LEITÃO, 1975; GIESE, 1991).

Os sanitizantes à base de cloro (cloro líquido, hipocloritos, cloroaminas inorgânicas e orgânicas) são os mais utilizados pelas indústrias de alimentos no Brasil por apresentarem baixo custo, rápida ação antimicrobiana, não serem afetados pela dureza da água, possuir ação esporicida e serem preparados e aplicados com facilidade (ANDRADE; MACEDO, 1996; SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975). Entretanto, são sensíveis à luz, corroem materiais como aço inoxidável e outros metais, e causam irritação à pele se manuseados inadequadamente (GIESE, 1991).

Temperaturas e concentrações elevadas, longos tempos de contato e redução do pH da solução sanitizante permitem uma maior eficiência na sanitização por compostos clorados. Porém, qualquer situação de abuso nestas condições, pode propiciar aumento das taxas de corrosão, mesmo em aço inoxidável. Condições ideais, portanto, devem ser determinadas. Segundo Turner (1982), a concentração máxima recomendada é 200mg/L de cloro livre e segundo Andrade e Macedo (1996) e Schmidt (1997) quando esses compostos são utilizados em circulação os parâmetros adotados são: pH entre 7,5 e 8,5, temperatura de 20 a 25°C e contato de 15 a 30 min.

A presença de substâncias orgânicas e/ou inorgânicas, muitas vezes presentes em resíduos de detergentes, pode causar a perda de efetividade do sanitizante por reagir quimicamente com o mesmo, além de proteger fisicamente os microrganismos da ação do agente químico (HONER, 1992). Por isso é de fundamental importância que a superfície seja adequadamente enxaguada antes da utilização do sanitizante.

Para verificação da eficiência de um sanitizante, o teste *Chambers* é utilizado, no qual deve-se atingir uma redução de 99,999% da população de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* a 20°C após 30s de aplicação do produto na concentração de uso (GIESE, 1991).

2.5.5. Enxágüe

Etapla realizada com a passagem de água para a retirada de compostos sanitizantes, caso seja necessário.

2.6. TROCADOR DE CALOR DE PLACAS

O trocador de calor de placas é muito utilizado na indústria de derivados de leite por apresentar elevada capacidade de transferência de calor, maior turbulência, fácil manutenção e ocupar menos espaço em relação aos trocadores tubulares (BANSAL; CHEN, 2005). Neste equipamento, o alimento circula entre canais formados por placas corrugadas sobrepostas. O número de placas necessárias é função da temperatura final desejada (BEHMER, 1999).

2.6.1. Características da higienização de um trocador de placas

O trocador de calor de placas é um equipamento de difícil higienização, principalmente quando se pasteuriza leite, pois as temperaturas utilizadas ocasionam a desnaturação protéica e a ruptura da emulsão graxa. Tal situação provoca o espalhamento dos lipídios sobre outras partículas lácteas, dificultando sua remoção (FORSYTHE; HAYES, 2002). Também possui canais estreitos por onde escoo o leite dificultando, dessa forma, a retirada dos resíduos (DELPLACE 1994 apud BANSAL; CHEN, 2005).

O fato de as temperaturas da superfície de troca térmica serem necessariamente mais elevadas que as temperaturas alcançadas pela corrente de fluido, para que ocorra uma eficiente transferência de calor, tem-se uma intensificação dos níveis de incrustações formadas em um trocador de calor (BANSAL; CHEN, 2005). Dessa maneira, a temperatura nas superfícies muitas vezes é superior a 75°C e, portanto, sobre elas o cálcio passa do estado solúvel para a forma insolúvel, além de favorecer a desnaturação protéica, como fator de incrustação às superfícies (PASSOS, 1992).

Incrustações minerais, constituídas de sais de cálcio e magnésio combinados com proteínas, promovem processos corrosivos e favorecem o desenvolvimento de microrganismos que sobrevivem ao processo de higienização (ANDRADE; MACEDO, 1996).

Essas incrustações, denominadas pedras de leite, também propiciam diminuição do coeficiente global de transferência de calor do equipamento, resultando em um tratamento térmico insuficiente. Em conjunto, provocam aumento da perda de carga, elevando o consumo de energia de operação do equipamento. Prejuízos financeiros são proporcionados com o aumento de paradas para limpeza, aumento da utilização de solução detergente e aumento no volume de efluentes a serem tratados. Essas circunstâncias indicam o quão é indispensável a realização de um adequado processo de higienização nas superfícies desse equipamento (PASSOS, 1992).

2.7. SISTEMAS DE HIGIENIZAÇÃO

A seleção da metodologia a ser empregada em um sistema de higienização depende do tipo de operação e de resíduo que deverá ser removido. Os sistemas de higienização podem ser realizados manualmente, por imersão, aspensão ou pelo sistema *clean-in-place* (LEITÃO, 1975; GIESE, 1991).

O sistema manual caracteriza-se pelo uso de detergentes pré-selecionados, a temperaturas entre 46°C e 49°C e aplicados com escovas ou esponjas. Raspadores, esguichos de alta e baixa pressão também podem ser utilizados como auxiliares no processo de limpeza. As escovas devem ser de material sintético resistente ao calor, ao produto químico e à umidade (GIESE, 1991).

O sistema de imersão é utilizado na limpeza de utensílios, componentes de equipamentos, válvulas, além do interior de tachos e tanques. Esses são tratados previamente com água morna e, posteriormente, são sujeitos à solução detergente durante 15-30 minutos à temperatura de 52°C. Ao final do processo são escovados e lavados com água a 82°C.

De acordo com Giese (1991) antes de ser desmontado, todo o equipamento deve sofrer uma pré-lavagem para remoção dos resíduos grosseiros das superfícies. Posteriormente as partes desmontadas são colocadas em tanques com recirculação para higienização. Os tempos envolvidos são de 30 a 40min para lavagem com detergente alcalino e de 5 a 10min para a utilização do detergente ácido.

O sistema de aspersão é utilizado para limpeza de interiores de tanques principalmente de equipamentos de difícil acesso como, por exemplo, esteiras transportadoras.

A higienização pelo sistema *clean in place* (CIP) tem substituído os processos de limpeza manual de equipamentos que trabalham com alimentos líquidos tais como leite, cerveja, bebidas não alcoólicas entre outros sendo mais empregados na limpeza e sanitização de tanques, trocadores de calor de placas, tubulações e homogeneizadores (FORSYTHE; HAYES, 2002; GIESE, 1991).

Este processo de higienização apresenta um custo inicial mais elevado, porém torna-se, com o tempo, mais econômico devido às vantagens que oferece (FORSYTHE; HAYES, 2002), a saber (SHARP 1985 apud KUNIGK, 1998):

- menor custo com mão de obra;
- funcionamento mais econômico com aproveitamento ótimo das soluções utilizadas;
- melhores níveis alcançados na higienização, desde que todas as etapas sejam cumpridas corretamente;
- maior rapidez e aumento da produtividade por não haver necessidade de desmonte de equipamentos;
- menor desgaste mecânico de tubulações e equipamentos pela não necessidade de desmontagem (LEITÃO, 1975)

- redução do custo com produtos de higienização, pois os mesmos podem ser reutilizados;
- redução de erros humanos associados à limpeza manual, pois todas as etapas são controladas automaticamente;
- maior segurança dos funcionários pois estes não precisam entrar nos equipamentos para realizar a limpeza manual e nem manipular soluções concentradas e aquecidas dos produtos de limpeza e sanitização.

Os parâmetros operacionais a serem estudados neste sistema, que garantem a eficiência no processo, são, basicamente, o tempo, a temperatura, a concentração dos agentes de limpeza e o grau de turbulência do escoamento (TURNER 1982 apud KUNIGK, 1998; REINEMANN; RABOTSKI, 1993). Desses parâmetros, os três primeiros são interdependentes, podendo-se aumentar qualquer um dos fatores com o objetivo de se reduzir os outros.

Em combinação com tempo, temperatura e concentração, a taxa de escoamento das soluções deve ser dimensionada adequadamente para um sistema CIP. Não somente para permitir o contato adequado do detergente com o resíduo, mas também para criar um estado de turbulência adequado para facilitar a remoção. Como recomendação, aconselha-se escoar as soluções com aumento de 1/3 em relação aos níveis normais de escoamento do produto alimentício em trocadores de calor e tubulações (TURNER, 1982).

Para aumentar o nível de turbulência do escoamento, com aumento de dez a vinte vezes na tensão de cisalhamento aplicada à superfície, tem-se implementado a utilização de injeção de ar em conjunto com as soluções, aumentando, dessa forma, a velocidade de circulação e a ação mecânica do processo (WONG, 1998).

O tempo é o fator de controle no processo CIP de mais fácil modificação e, também, o mais pressionado pelos operadores, pois se procura sempre reduzi-lo (KUNIGK, 1998). A redução deve ser feita de forma criteriosa, pois tempo de contato insuficiente proporciona uma inadequada ação dos agentes de limpeza.

O tempo de passagem da água de pré-lavagem e de enxágüe deve ser corretamente estimado, pois o reduzindo em demasia, pode-se ter uma ineficiente remoção de resíduos e de detergente. Por outro lado, se for aumentando em demasia, geram-se grandes volumes de efluentes, acarretando maiores custos para a empresa (KUNIGK, 1998).

Sistemas CIP modernos são controlados através de *softwares* que regulam automaticamente as concentrações, as temperaturas das soluções e suas taxas de escoamento. Registram o processo através da utilização de gráficos e interrompem-no, sempre que algum desvio ao previamente programado ocorrer (HONER, 1992). Contudo, de acordo com Fryer; Christian e Liu (2006), esses processos são altamente desenvolvidos e automatizados, porém raramente otimizados.

De acordo com Bakka (1991, apud Giese, 1991) existem três sistemas diferenciados de CIP: sistemas com um, dois ou três tanques.

O sistema com um tanque (simples-passo) tem o descarregamento das soluções após a circulação diretamente para rede de captação. Os outros sistemas reutilizam as soluções e a água de enxágüe. Nos sistemas com dois tanques um é destinado à água de pré-enxágüe e outro para solução de detergente. Já no sistema com três tanques, repete-se o modelo de dois tanques, com um adicional contendo água potável para enxágüe final. De acordo com o mesmo autor, apesar de os sistemas de recirculação possuírem um custo inicial elevado, apresentam um custo operacional menor que o de tanque único, pois se recuperam não apenas as soluções mas, também, parte da energia térmica que por ventura possa ser utilizada.

O maior problema gerado com processos CIP é a redução de responsabilidade por parte dos operadores não treinados, acarretando não conformidades no processo. Segundo Turner (1982), em sistemas manuais de higienização a rotina de trabalho inclui uma observação contínua das condições higiênicas das partes desmontadas nos equipamentos. Enquanto que em sistemas CIP, a obrigação do operador, muitas vezes em sua opinião, é apenas acionar o botão de início do processo. É importante observar, também, o relatado por Wong (1998) de que microrganismos podem permanecer na superfície higienizada mesmo após processos CIP serem realizados.

A falta de cuidado ao realizar procedimentos de higienização periódicos pode originar problemas de incrustações que são potencializados em indústrias onde o sistema CIP está instalado. De acordo com Turner (1982) se por algum motivo, um equipamento fica sem a rotina de limpeza, a quantidade de resíduos, devido às produções realizadas, aumenta, o que dificultará a sua remoção, além de necessitar concentrações mais elevadas de detergente futuramente.

É importante destacar que mesmo com o sistema CIP implantado na indústria, algumas partes do sistema devem ser higienizadas manualmente como estruturas presentes em tanques tais como agitadores, gaxetas, coletores de amostras, válvulas e em envasadoras como copos e pistões, correntes de movimentação e calefadores (BARNARD; IVKOVICH, CAULLER, 1992).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As figuras 1 a 3 apresentam o trocador de calor da marca Eletrônica Venetta® modelo UPL/EV utilizado nos ensaios e o quadro 1 representa o esquema de seu funcionamento.



FIGURA 1 – Trocador de calor de placas utilizado nos ensaios.



FIGURA 2 – Setor de aquecimento do trocador de calor de placas. No destaque encontra-se a válvula automática de controle de entrada de água quente.

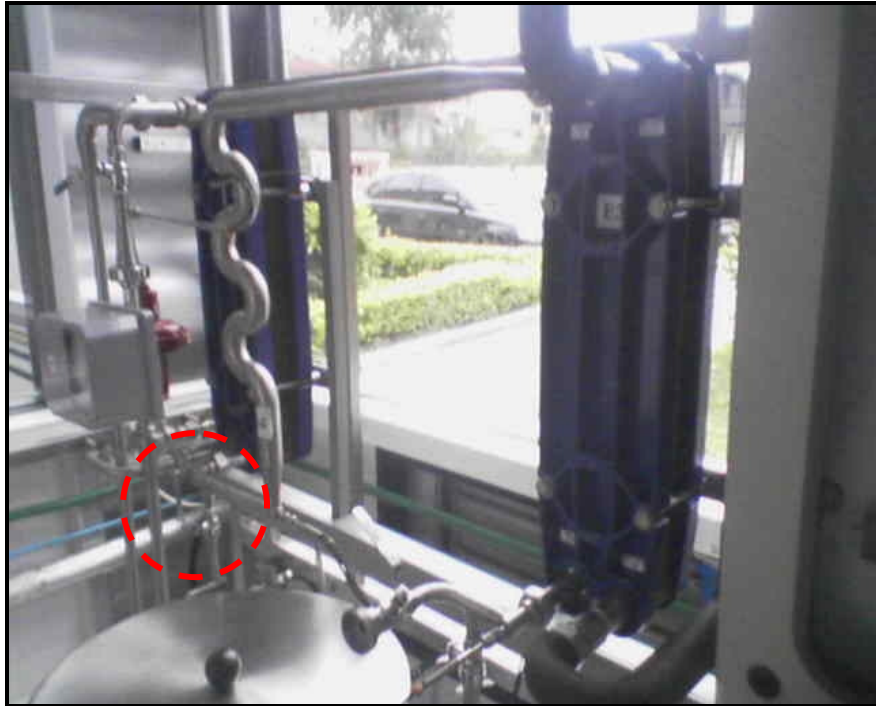
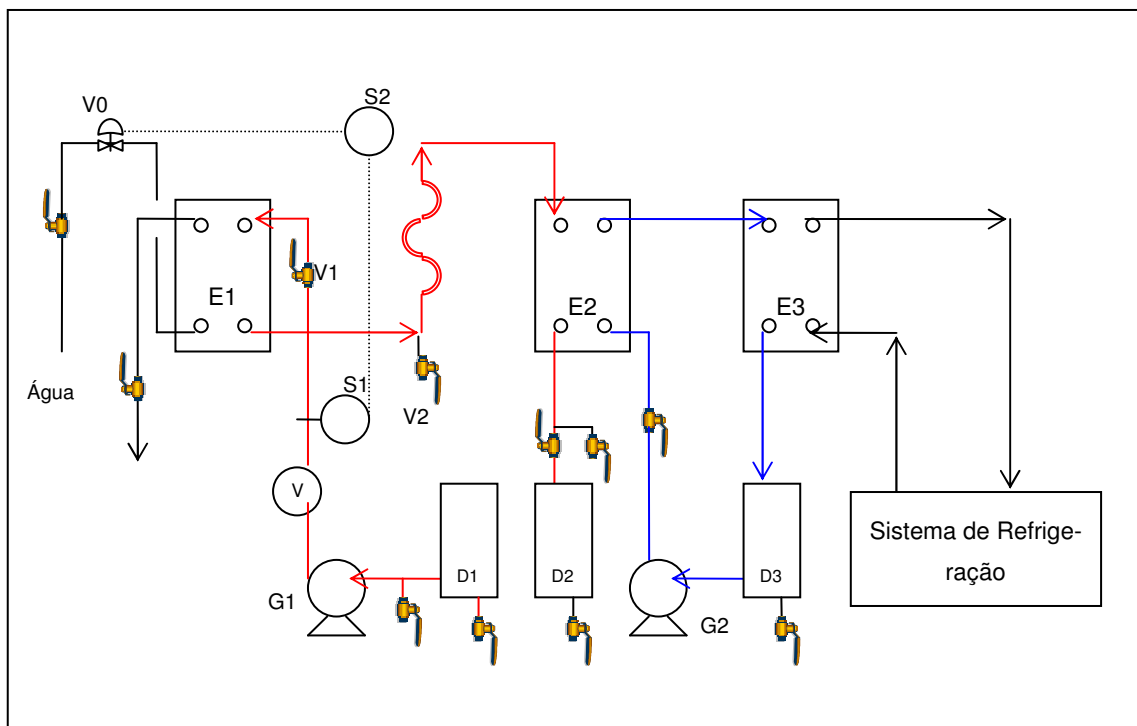


FIGURA 3 – Trocador de calor de placas. No destaque ressalta-se a válvula manual de retirada de amostras.



QUADRO 1 – Quadro sinóptico explicativo do funcionamento do trocador de calor utilizado. Adaptado de ElettronicaVeneta (2000?).

As soluções de detergente e água utilizadas no enxágüe, com temperatura inicial registrada pelo sensor de temperatura S1, foram colocadas no tanque de depósito D1. O acionamento da bomba G1 promoveu o fluxo das soluções e a vazão volumétrica foi controlada através da abertura da válvula tipo esfera V1 e medida através do medidor de vazão V.

No conjunto de placas E1 ocorreu o aquecimento do conteúdo do tanque D1 utilizando-se água quente, cuja vazão é controlada pela válvula automática V0. A abertura da válvula é função da temperatura de saída da solução de E1. Esta temperatura é registrada pelo sensor S2.

As amostras de solução de detergente e de água de enxágüe retiradas para análises dos ensaios são obtidas pela abertura da válvula manual V2.

Em E2 a solução de detergente sofreu resfriamento através de troca térmica realizada pelas placas. A solução refrigerante de etileno-glicol é resfriada no trocador E3.

Após o resfriamento, as soluções utilizadas foram coletadas no tanque D2.

3.1. DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE RESÍDUOS DE LEITE NA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM

Neste ensaio foi determinada a cinética de remoção de resíduos de leite da superfície do trocador de calor de placas durante a etapa de pré-lavagem com água. A variável utilizada, para determinar a presença de cálcio, foi a dureza cálcica da água, que é definida como a quantidade de sais de cálcio presente na amostra, expressa em carbonato de cálcio (CaCO_3) (PREGNOLATTO; PREGNOLATTO, 1985).

Para esta determinação realizou-se o seguinte procedimento:

- a) Reconstituição de leite em pó integral da marca La Sereníssima, através da mistura de 700g com 7L de água a 50°C, conforme instrução do fabricante. O aquecimento da água foi realizado para facilitar a solubilização do produto.
- b) Pasteurização de leite reconstituído à temperatura de 72°C no trocador de calor de placas para deposição de resíduos sobre a sua superfície. A circulação do leite pelo interior do equipamento ocorreu durante 15 min.

- c) Circulação da água de pré-lavagem para a prévia remoção dos resíduos utilizando vazões de 10, 15, 20, 30 e 40L/h. A água utilizada para a realização do enxágüe encontrava-se na temperatura ambiente (aproximadamente 25°C). Esta etapa teve duração de 15min para as três primeiras vazões e 10min para as duas últimas. Para as três primeiras vazões foram coletadas amostras da válvula V2 a cada minuto para determinação da dureza cálcica. Para as últimas vazões, nos 5 minutos iniciais foram coletadas amostras a cada 30s e nos 5 minutos restantes, amostras foram retiradas a cada minuto transcorrido. Cada teste foi realizado em triplicata.
- d) Determinação da dureza cálcica (PREGNOLATTO; PREGNOLATTO, 1985) das amostras coletadas:

Os materiais utilizados nestes ensaios foram pipetas de 50mL, pipetas de 2mL, frascos erlenmeyer de 250mL e buretas de 25mL. Os reagentes necessários foram: solução de EDTA 0,01M, solução tampão de hidróxido de sódio 0,5N (20,0g de hidróxido de sódio e água até completar um volume de 1000mL) e indicador murexida preparado com a mistura em um almofariz de 0,2g de murexida com 100g de cloreto de sódio.

Para cada teste transferiram-se 50,0mL da amostra para um frasco de Erlenmeyer de 250mL e adicionaram-se 2,0mL da solução de hidróxido de sódio. Após agitação, titulou-se com a solução de EDTA, usando-se indicador murexida. O ponto de viragem ocorre quando a coloração vermelha passa a púrpura.

O cálculo para determinação da concentração de sais de cálcio, expressa em carbonato de cálcio, nas águas de enxágüe foi determinado pela equação (1):

$$[\text{CaCO}_3] = \frac{1000 \times V \times f}{A} \quad [\text{mg/L}] \quad (1)$$

V = n° de mL da solução de EDTA gasto na titulação

f = fator da solução de EDTA

A = n° de mL da amostra.

Para cada amostra, o teste de concentração de cálcio foi realizado em triplicata.

Para determinação do modelo matemático de cada teste realizado, relacionou-se o valor obtido de concentração de sais de cálcio das amostras coletadas no mesmo período de tempo de escoamento, e fez-se a média desses valores. Obteve-se o comportamento gráfico e o modelo matemático através da utilização do *software* Origin® versão 6.0.

3.2. DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE DETERGENTE ALCALINO

Este ensaio foi realizado para a avaliação da cinética de remoção de detergente alcalino do trocador de calor de placas, durante o enxágüe com água potável, variando-se a temperatura e vazão da água.

Para isso, realizou-se o seguinte procedimento:

- a) Foi feita a circulação da solução detergente pelo trocador de calor por 10min a uma vazão constante de 20L/h. O detergente de uso industrial aplicado é o NIPPOLAT – 300[®] líquido, produzido pela NIPPON CHEMICAL, que deve ser diluído a uma concentração de 2% conforme instrução do fabricante.
- b) Posteriormente realizou-se o escoamento da água de enxágüe no interior do trocador de calor conforme a vazão avaliada. Amostras foram coletadas a cada minuto de escoamento, através da abertura da válvula V2. O tempo total desta etapa foi de 10 minutos. Para os ensaios em que se avaliou a influência da vazão da água, manteve-se a temperatura da mesma constante em 50°C. As vazões avaliadas, controladas pelo medidor V, foram: 10, 15, 20 e 40L/h. Já para os ensaios em que se avaliou a influência da temperatura da água, manteve-se a vazão constante em 20 L/h e as temperaturas utilizadas foram: 25, 45, 55 e 65°C. A temperatura da água foi controlada através do acionamento da válvula V0 pelo sensor S2. Cada teste foi realizado em triplicata.
- c) Determinação da alcalinidade das amostras através de adaptação do teste de acidez por titulação descrito por Pregnoatto e Pregnoatto (1985). Os materiais utilizados necessários para realização dos ensaios foram frascos erlenmeyer de 250mL e bureta de 25mL. Os reagentes utilizados foram indicador fenolftaleína 1% e solução de ácido clorídrico 0,10N ou 0,010N. Para realização dos testes obtiveram-se 25mL da amostra que foram transferidos para um frasco erlenmeyer. Após adição de 2 gotas do indicador, titulou-se com ácido clorídrico até a amostra ficar incolor. Para obtenção da alcalinidade em solução, fez-se o cálculo demonstrado pela equação (2):

$$\text{Alcalinidade} = \frac{N \times V \times Eq \times f}{v} \quad [\text{g/L}] \quad (2)$$

N = normalidade da solução de ácido clorídrico utilizada na titulação

V = volume em litros da solução de ácido clorídrico gasto na titulação

f = fator da solução de ácido clorídrico

Eg = equivalente-grama do NaOH

v = volume em litros da amostra da água de enxágüe utilizada na titulação

- d) Para a determinação do modelo matemático de cada teste realizado, relacionou-se o valor obtido de alcalinidade das amostras coletadas no mesmo período de tempo de escoamento, e fez-se a média desses valores. Obteve-se o comportamento gráfico e o modelo matemático através da utilização do *software* Origin[®] versão 6.0.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE RESÍDUOS DE LEITE NA ETAPA DE PRÉ-LAVAGEM

O gráfico 1 ilustra a influência do tempo de enxágüe na concentração de cálcio presente na água de enxágüe, sendo esta mantida a temperaturas médias de 50°C. Observa-se que essas curvas tendem a atingir um patamar à medida que o tempo de enxágüe aumenta, ou seja, a concentração de cálcio na água de enxágüe tende a atingir um valor constante. Os gráficos 2 a 6 ilustram os resultados obtidos para cada vazão.

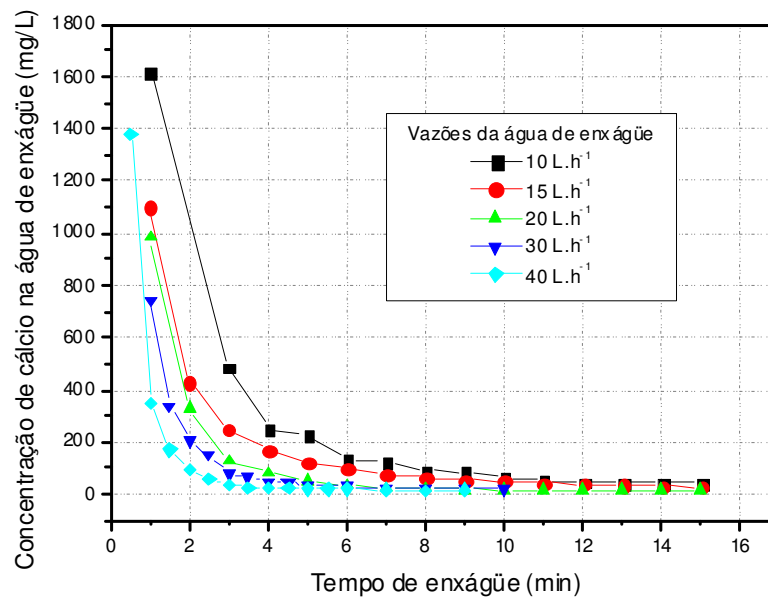


GRÁFICO 1 - Influência do tempo de enxágüe, nas vazões testadas, na concentração de sais de cálcio na água de enxágüe na etapa de pré-lavagem de um trocador de calor de placas utilizado para pasteurizar leite reconstituído

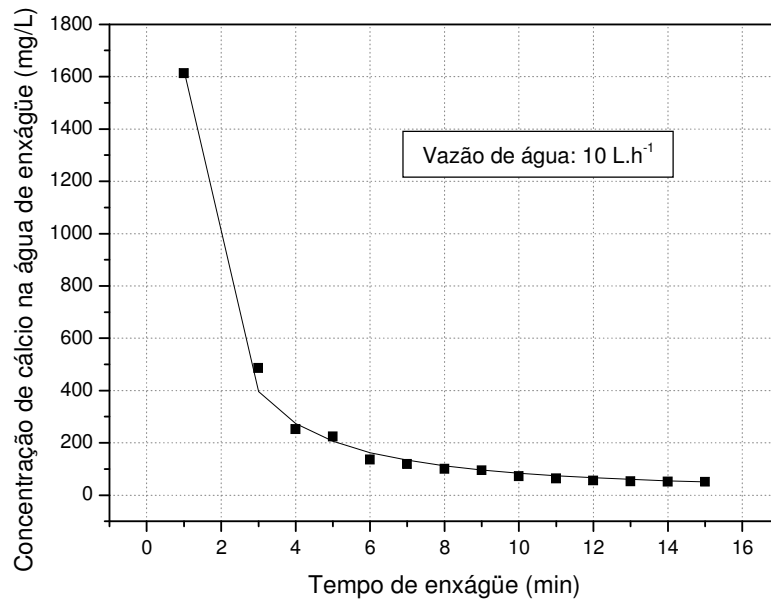


GRÁFICO 2 - Influência do tempo de enxágue na concentração de sais de cálcio, presentes na água de enxágue da etapa de pré-lavagem, de um trocador de calor de placas utilizado para pasteurizar leite reconstituído. A vazão empregada de água, nesse processo, foi de 10L.h⁻¹

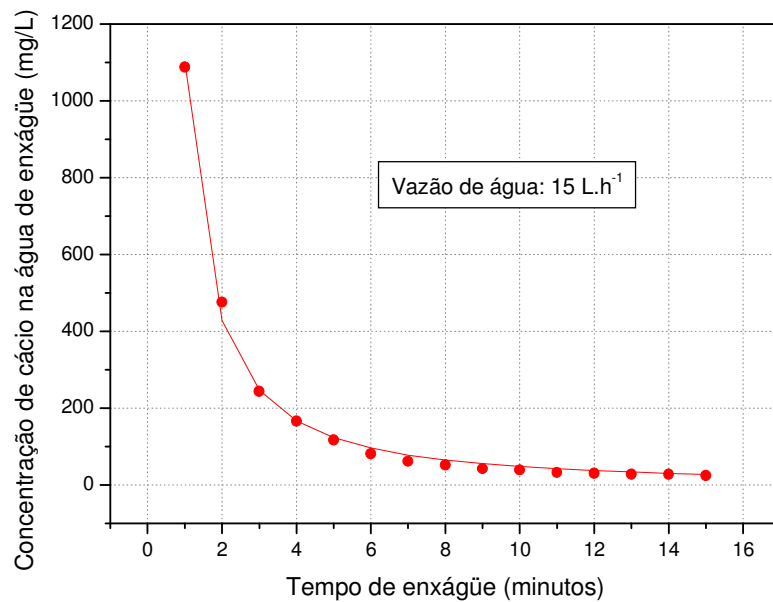


GRÁFICO 3 - Influência do tempo de enxágue na concentração de sais de cálcio, presentes na água de enxágue da etapa de pré-lavagem, de um trocador de calor de placas utilizado para pasteurizar leite reconstituído. A vazão empregada de água, nesse processo, foi de 15L.h⁻¹

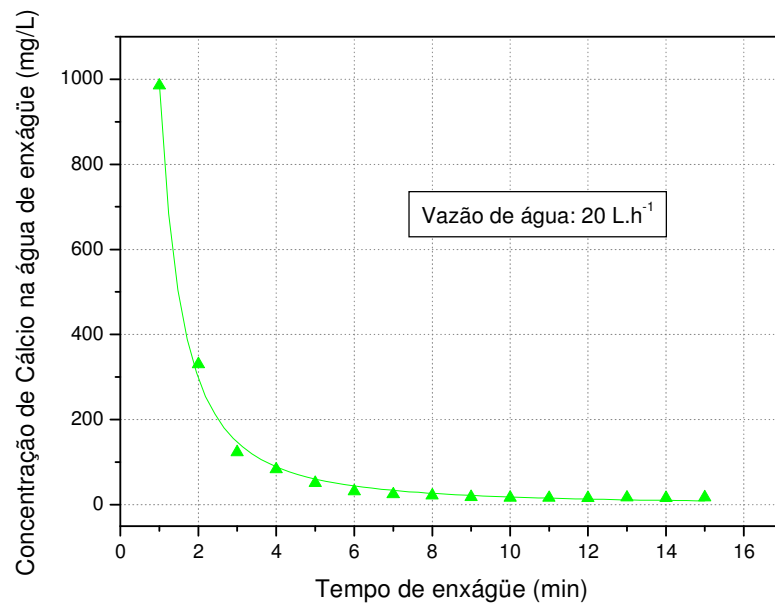


GRÁFICO 4 - Influência do tempo de enxágüe na concentração de sais de cálcio, presentes na água de enxágüe da etapa de pré-lavagem, de um trocador de calor de placas utilizado para pasteurizar leite reconstituído. A vazão empregada de água, nesse processo, foi de 20L.h⁻¹

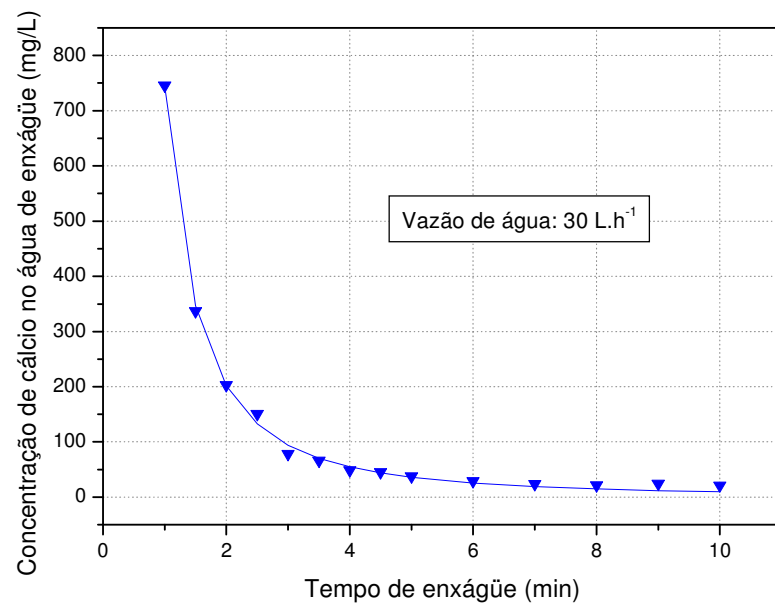


GRÁFICO 5 - Influência do tempo de enxágüe na concentração de sais de cálcio, presentes na água de enxágüe da etapa de pré-lavagem, de um trocador de calor de placas utilizado para pasteurizar leite reconstituído. A vazão empregada de água, nesse processo, foi de 30L.h⁻¹

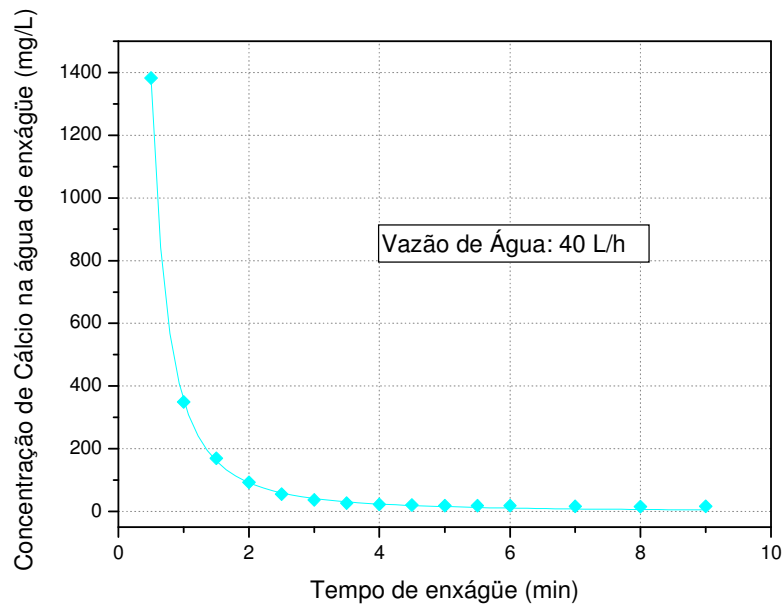


GRÁFICO 6 - Influência do tempo de enxágüe na concentração de sais de cálcio, presentes na água de enxágüe da etapa de pré-lavagem, de um trocador de calor de placas utilizado para pasteurizar leite reconstituído. A vazão empregada de água, nesse processo, foi de $40\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$

Do ponto de vista prático, a partir de um determinado instante da etapa de pré-lavagem, é necessário utilizar um grande volume de água para remover uma pequena quantidade de resíduos. A equação matemática que melhor ajusta os pontos experimentais do gráfico 1 é uma equação exponencial do tipo:

$$[Ca^{2+}] = a \cdot \Theta^b \quad (3)$$

sendo que $[Ca^{2+}]$ representa a concentração de sais de cálcio na água de enxágüe, Θ representa o tempo de enxágüe e os parâmetros a e b são constantes que dependem das condições nas quais o enxágüe é realizado e cujos valores encontram-se na tabela 1. Linearizando-se a equação 3 obtém-se:

$$\log[Ca^{2+}] = \log a + b \cdot \log \Theta \quad (4)$$

Observa-se, portanto, a partir da equação (4) que o parâmetro b representa a constante de velocidade com a qual a concentração de cálcio é reduzida na água de enxágüe com o tempo de duração da etapa de pré-lavagem e o parâmetro a representa a concentração de sais de cálcio (Ca^{2+}) presente na água de enxágüe no instante 1 minuto. Verifica-se a partir dos valores dos parâmetros apresentados na tabela 1 que quadruplicando a vazão da água utilizada no enxágüe, ou seja, passando de 10L/h para 40L/h aumentou-se em 53% a constante de velocidade com a qual a concentração de cálcio é reduzida na água de enxágüe e que a concentração de cálcio que se encontra presente na água de enxágüe após o primeiro minuto de processo reduziu-se 78%, ou seja, passou de 1622,91mg/L para 356,02mg/L.

TABELA 1 – Parâmetros das equações matemáticas que representam a concentração de sais de cálcio na água de enxágüe, utilizada em diferentes vazões de escoamento, na etapa de pré-lavagem de um trocador de calor de placas, após pasteurização de leite reconstituído

Vazão (L/h)	parâmetro		r^2
	a	b	
10	1622,91	1,282	0,994
15	1408,24	1,571	0,9989
20	989,65	1,737	0,998
30	742,89	1,881	0,998
40	356,05	1,957	0,9997

Relacionaram-se os valores obtidos das constantes de velocidade com as vazões testadas (Q) e obteve-se o gráfico 7. A equação (5) ilustra a função matemática obtida entre esses dois parâmetros. Ao substituir os parâmetros da equação (5) pelos valores experimentais obtidos a partir do gráfico 7 obteve-se a expressão matemática (6). Utilizando o modelo matemático ajustado a partir dos dados experimentais, concluiu-se que a constante de velocidade atinge um valor praticamente constante a partir de uma vazão de 40L/h, ou seja, para o trocador de calor de placas em questão, a constante de velocidade atinge um valor muito próximo do máximo com essa taxa de escoamento, pois quando se utiliza uma vazão com um valor muito elevado (tendendo ao infinito), a constante de velocidade se torna igual a 1,981, apenas 1,2% maior que a constante de velocidade a 40L/h, cujo valor é 1,957.

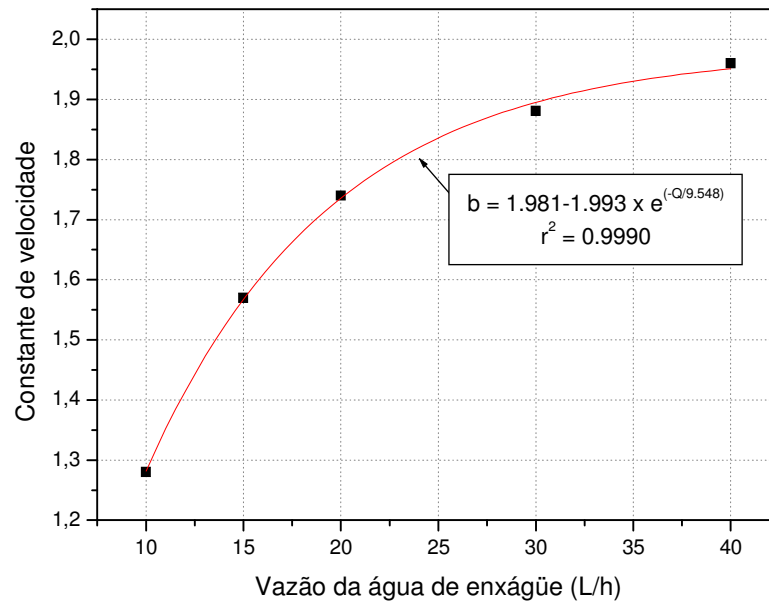


GRÁFICO 7 – Variação das constantes de velocidade, obtidas das equações de remoção de sais de cálcio pela água de pré-lavagem, com a vazão de escoamento

$$b = p_1 - p_2 e^{\left(\frac{-Q}{p_3}\right)} \quad (5)$$

$$b = 1,981 - 1,993 e^{\left(\frac{-Q}{9,548}\right)} \quad (6)$$

Nas equações 5 e 6 b representa a constante de velocidade e Q a vazão de água no interior do trocador de calor de placas em $L \cdot h^{-1}$.

A remoção de resíduos de leite expressa pela diminuição da concentração de cálcio na água de enxágüe diverge dos estudos realizados por Jeurnink e Brinkman (1994), no qual não houve presença de cálcio na água de pré-lavagem utilizada para higienização de trocador de calor pós-escoamento de leite. Porém converge com estudos realizados por Middlemiss et al. (1985) que estudando a remoção de gorduras e proteínas, provenientes de escoamento de leite integral em tubulação de vidro pela água de pré-lavagem, obteve uma queda expressiva na concentração de resíduos nos primeiros dois minutos; não observando, porém, substancial remoção destes nutrientes após 3 a 5 min de enxágüe. O mesmo autor, ao analisar seus resultados, torna-os válidos comparando-os com os obtidos por Anderson (1972 apud MIDDLEMISS et al., 1985) que mensurou resíduos de cálcio em placas de aço inoxidável.

A remoção de cálcio é justificada pela composição química e física dos resíduos de leite. De acordo com Jeurnink e Brinkman (1994) e Bansal e Chen (2005) a composição dos resíduos de leite incrustados em um trocador de calor, com operação a 70°C-90°C, possui 50-60% de proteínas, 30-35% de minerais e 4-8% de gorduras. Para Tissier e Lalande (1986 apud Jeurnink e Brinkman, 1994) e Bansal e Chen (2005), esses resíduos possuem duas camadas com distintas composições: uma primeira camada, densa, acinzentada, de estrutura granular, constituída principalmente por minerais, localizada junto à superfície de aço inoxidável; e uma segunda camada, acima da primeira, normalmente com espessura inferior a 5µm, mais esponjosa, esbranquiçada e que possui na sua composição química principalmente proteínas e gorduras.

A camada de proteínas é formada a temperaturas entre 75°C e 110°C. Já a camada de minerais é formada a temperaturas superiores a 110°C. É originada principalmente pela precipitação do sal fosfato de cálcio ocorrida durante o tratamento térmico do leite (JUN ; PURI, 2005, BANSAL; CHEN, 2005). A gordura fica aprisionada na camada de proteína, de localização mais afastada em relação à superfície de troca térmica, sendo dessa forma, esse depósito lipo-protéico é o primeiro a ser removido (MIDDLEMISS et al., 1985). Em nosso estudo a remoção de cálcio ocorreu de forma mais rápida, pois as temperaturas envolvidas não provocaram a formação de fosfato de cálcio, pedra de leite, sobre a superfície do trocador.

De acordo com Perlat (1986 apud Jeurnink e Brinkman, 1994) a remoção da camada orgânica é realizada através da extração de grandes fragmentos de resíduos, que acaba provocando a remoção de parte dos minerais. A água, como agente suspensor de resíduos e de detergentes, tem por finalidade fornecer energia mecânica de cisalhamento e carrear as sujidades para fora do equipamento.

É importante ressaltar que a cinética obtida foi através da utilização de leite reconstituído e, portanto, a capacidade de formação de resíduos é menor, pois 25% da β -lactoglobulina, proteína presente no leite apontada como a dominante na indução da formação do resíduo, já sofreu desnaturação durante a fabricação do leite em pó e a concentração de cálcio é 9% inferior em relação ao leite integral (BANSAL; CHEN, 2005).

A fim de se aumentar a eficiência do processo poder-se-ia aumentar a temperatura da água. Porém, variar a temperatura da água de enxágüe não ocasiona diferenças significativas no processo de remoção. Estudos realizados por Middlemiss et al. (1985) demonstraram que o nível de remoção de resíduos com água a 20°C apresentou resultados similares aos obtidos temperatura de 40°C. De acordo com o autor, a remoção de resíduos neste caso é basicamente um processo físico de separação dos substratos mais fracamente aderidos.

4.2. DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE DETERGENTE ALCALINO

Para a determinação da cinética de remoção de detergente alcalino, dois parâmetros distintos da água de enxágüe foram avaliados: a vazão e a temperatura de escoamento.

4.2.1. Influência da vazão de água na remoção de detergente alcalino

Os gráficos 8 a 11 ilustram a remoção do detergente alcalino do interior do trocador de calor de placas através da determinação da alcalinidade das amostras das águas de enxágüe. A temperatura média da água utilizada nesta série de ensaios foi 50°C e variou-se a vazão da água.

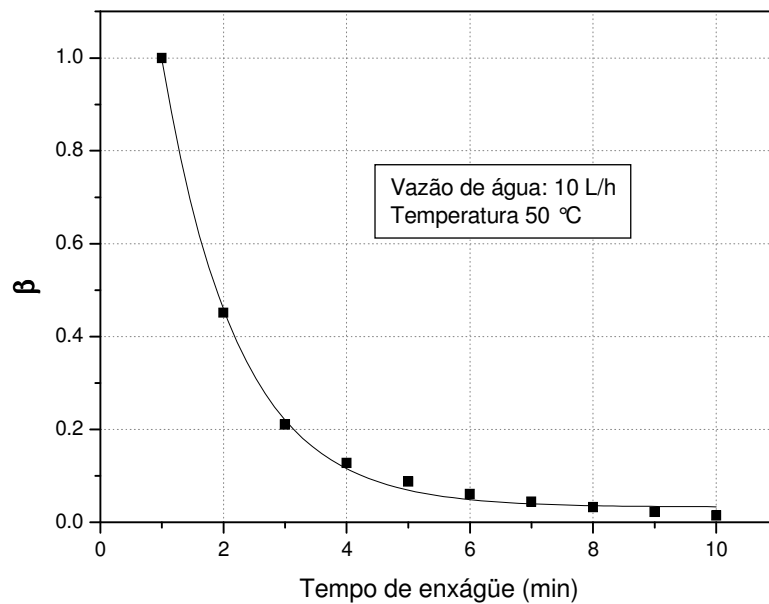


GRÁFICO 8 – Variação de β em função do tempo de enxágüe utilizando como parâmetros de escoamento para a água: vazão de 10L/h e temperatura média de 50°C

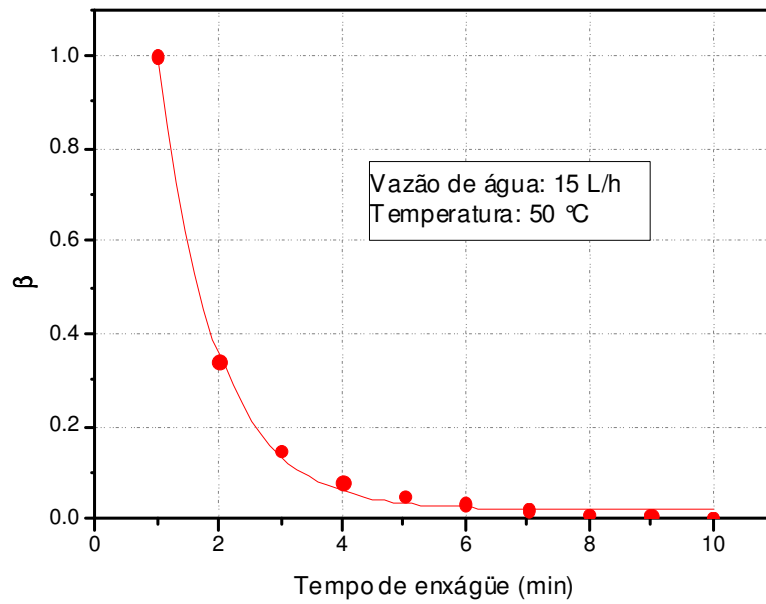


GRÁFICO 9 – Variação de β em função do tempo de enxágüe utilizando como parâmetros de escoamento para a água: vazão de 15L/h e temperatura média de 50°C

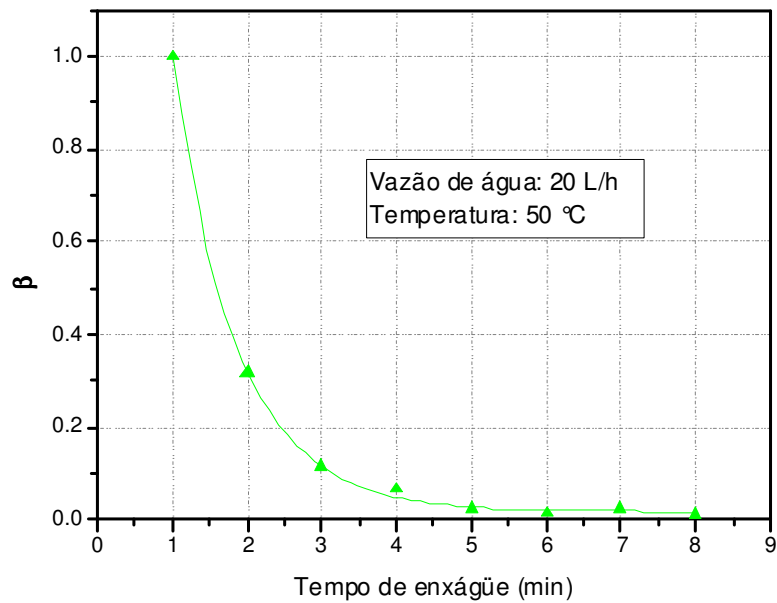


GRÁFICO 10 – Variação de β em função do tempo de enxágüe utilizando como parâmetros de escoamento para a água: vazão de 20L/h e temperatura média de 50°C.

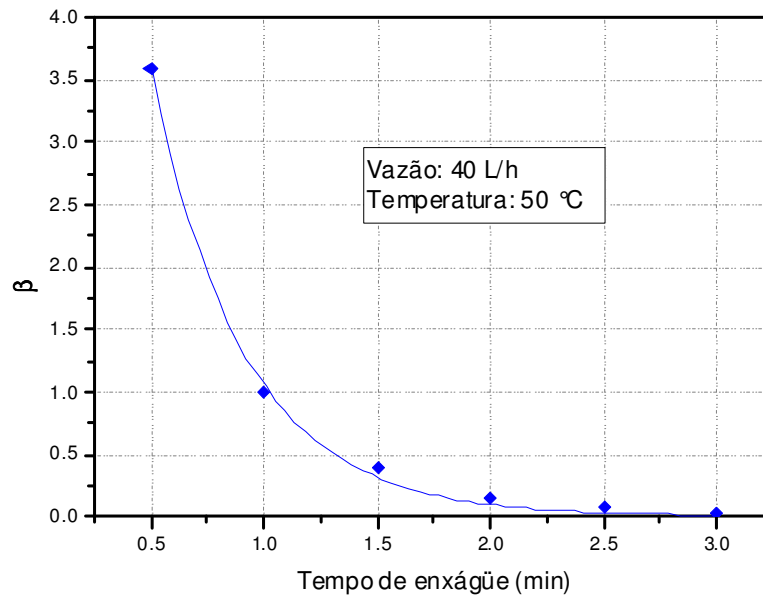


GRÁFICO 11 – Variação de β em função do tempo de enxágüe utilizando como parâmetros de escoamento para a água: vazão de 40L/h e temperatura média de 50°C.

Observa-se que a partir dos resultados experimentais pode-se ajustar uma equação do tipo:

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot e^{-\frac{\Theta}{\alpha_3}} \quad (7)$$

Na equação 7, β representa a relação entre as concentrações de hidróxido de sódio presentes na água de enxágüe após a saída do trocador de calor e no tempo 1 minuto de enxágüe $[NaOH]_{\Theta=\Theta} / [NaOH]_{\Theta=1}$ ¹¹. Por sua vez, Θ representa o tempo de enxágüe (minutos), α_1 , α_2 e α_3 são as constantes da equação que apresentam valores distintos para cada valor de vazão, sendo que os valores destas três últimas constantes encontram-se na tabela 2. Quanto maior a turbulência, da água de enxágüe, menor será o valor de $[NaOH]_{\Theta}$ na água de enxágüe para um mesmo valor de Θ (mais hidróxido de sódio é removido).

¹¹ $\frac{[NaOH]_{\Theta=\Theta}}{[NaOH]_{\Theta=1}} = \frac{\text{concentração de NaOH em água de enxágüe em } \Theta(\text{min})}{\text{concentração de NaOH em água de enxágüe em 1 min}}$

TABELA 2 – Valores das constantes α_1 , α_2 e α_3 da equação obtida pela modelagem do processo de remoção de detergente alcalino, assim como os coeficientes de determinação das equações em função da vazão da água de enxágüe

Vazão (L/h)	$\alpha_1 \cdot 10^2$	α_2	α_3 (min)	r^2
10	3,296	2,186	1,221	0,998
15	2,007	2,830	$9,367 \cdot 10^{-1}$	0,998
20	1,744	3,128	$8,627 \cdot 10^{-1}$	0,9993
40	0,677	12,112	$4,096 \cdot 10^{-1}$	0,9985

Analisando a equação (7) observa-se que β será igual a α_1 quando o tempo de enxágüe tender ao infinito e, portanto será a menor relação possível nesse processo de enxágüe. Em outras palavras, não se conseguirá uma relação menor do que essa no processo de enxágüe. Observa-se que, quanto maior for a vazão, menor será esse valor, ou seja, menos resíduos de detergente sobrarão sobre a superfície. Quando o tempo de enxágüe tende a zero, obtém-se o maior valor de possível de β . O potencial do processo de enxágüe para remover o hidróxido de sódio das superfícies do trocador de calor de placas equivale à diferença entre o valor β na condição de tempo infinito e o valor no início do processo, ou seja, tempo zero. Porém, como α_1 é muito menor que α_2 , este, diretamente, representa todo o potencial do processo de enxágüe que uma determinada vazão apresenta para remover o detergente alcalino. Assim sendo, utilizando-se uma vazão de água igual a 40L/h ao invés de 10L/h, consegue-se aumentar o potencial de remoção do enxágüe em 450%.

A modelagem matemática, descrita na equação (7), pode determinar o tempo de processo, para cada vazão utilizada, para o qual, variações no valor de β , e, conseqüentemente, na concentração de NaOH na água de enxágüe, não são significativas. Dessa forma, o processo, neste instante, pode ser interrompido, a fim de se reduzir desperdícios de água.

O gráfico 12 apresenta a relação entre o maior valor de β possível de ser obtido quando Θ tende a zero em função da vazão de água da etapa de enxágüe. Observa-se que o potencial de remoção de hidróxido de sódio do interior do trocador de calor aumenta com a vazão de água e, portanto, com a turbulência do processo. Assim sendo, caso fosse possível aumentar indefinidamente a vazão de água, mais rápido seria o processo de enxágüe. Infelizmente, existem restrições tanto com relação à capacidade das bombas como com relação à resistência mecânica do trocador de calor em relação ao aumento da vazão de água, mas deve-se, sempre que possível, utilizar todo o potencial da bomba para acelerar o processo de enxágüe.

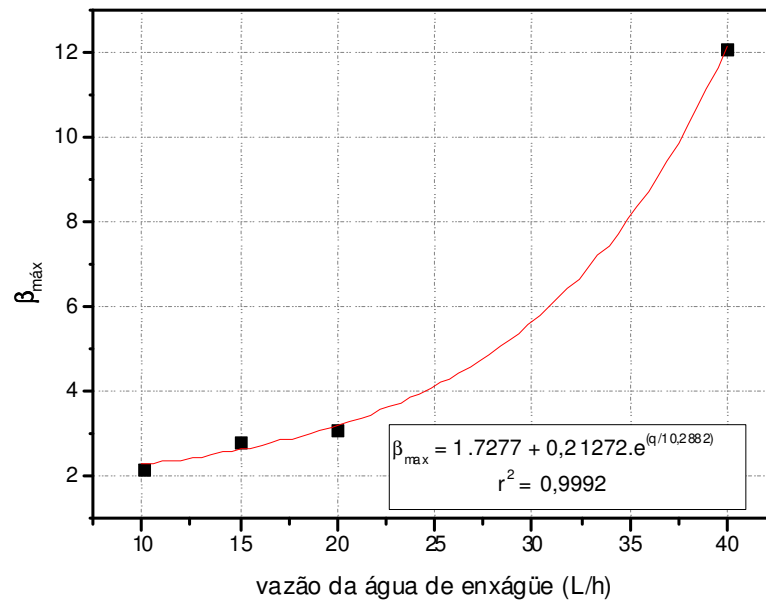


GRÁFICO 12 – β_{\max} possível de ser obtido, no processo de enxágüe, para remoção de hidróxido de sódio das superfícies de um trocador de calor de placas, em função da vazão de água a temperatura constante de 50°C

Por sua vez, α_3 representa um coeficiente de atenuação do processo de remoção do hidróxido de sódio do interior do trocador de calor de placas. Quanto maior for seu valor, maior será o valor de β , ou seja, menos hidróxido de sódio será removido com o enxágüe. A partir da tabela 3 observa-se que α_3 diminui à medida que o valor da vazão aumenta.

O modelo matemático, descrito na equação (7), também é válido para representar as variações do valor de β_{\max} e, conseqüentemente, o potencial de remoção de detergente alcalino pela vazão testada. Substituindo os parâmetros, pelos dados obtidos do gráfico 12, obtém-se a expressão matemática (8).

$$\beta_{\max} = 1,728 + 2,127 \cdot 10^{-1} e^{\left(\frac{q}{10,288}\right)} \quad (8)$$

O estudo da equação (8) constatou que o aumento da vazão de escoamento, nas condições experimentais testadas, acarreta em elevação da eficiência da remoção do detergente alcalino.

Os resultados obtidos são coerentes com o afirmado por Jeurnink e Brinkman (1994) de que o decréscimo na taxa de escoamento de soluções em um trocador de calor acarreta em queda na taxa de higienização.

4.2.2. Influência da temperatura da água na remoção de detergente alcalino

Os gráficos 13 a 16 ilustram a influência da temperatura no processo de remoção de hidróxido de sódio utilizando apenas água a uma vazão de 20L/h.

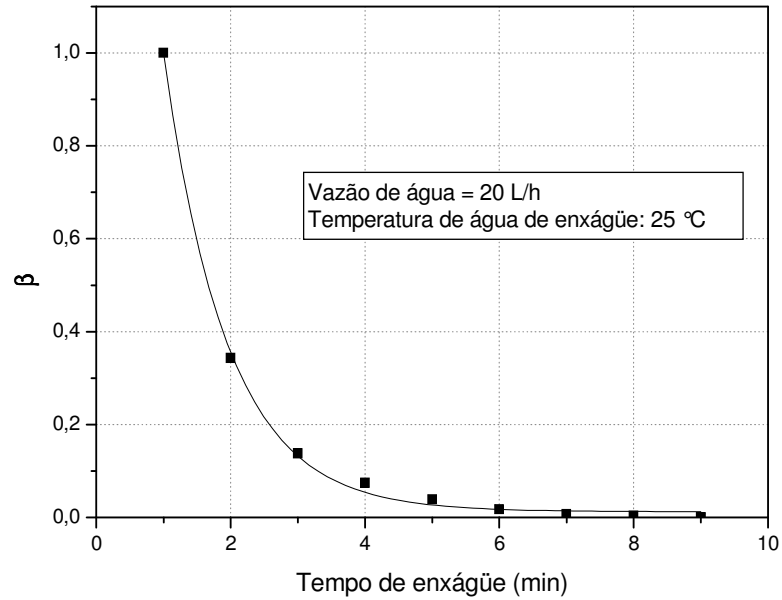


GRÁFICO 13 – Variação de β em função do tempo de enxágüe utilizando como parâmetros de escoamento para a água: vazão de 20L/h e temperatura média de 25°C

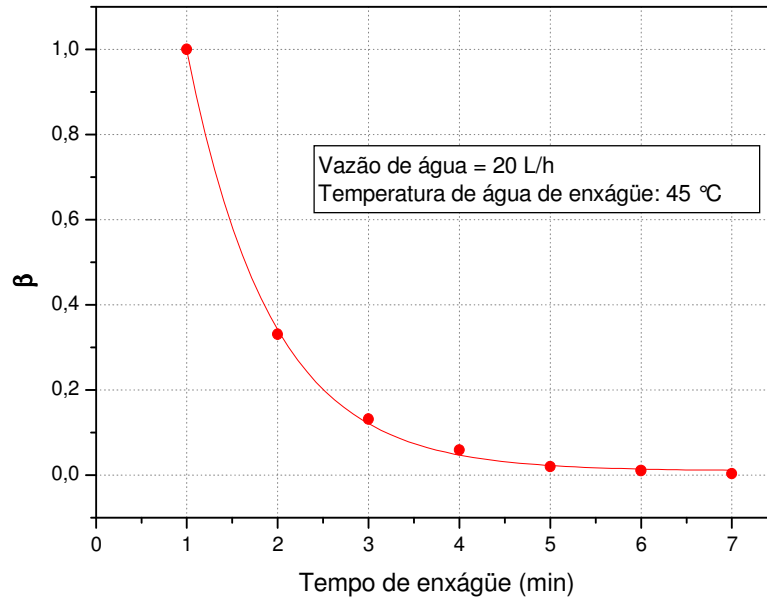


GRÁFICO 14 – Variação de β em função do tempo de enxágüe utilizando como parâmetros de escoamento para a água: vazão de 20L/h e temperatura média de 45°C

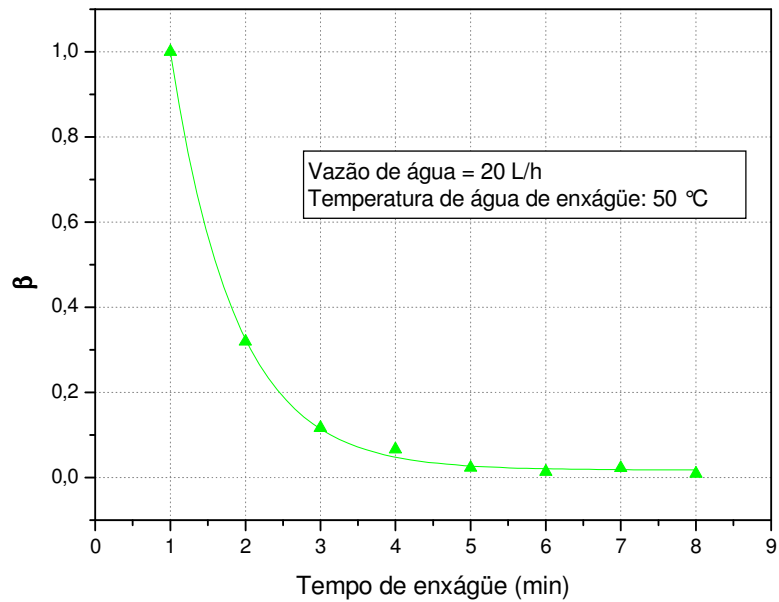


GRÁFICO 15 – Variação de β em função do tempo de enxágüe utilizando como parâmetros de escoamento para a água: vazão de 20L/h e temperatura média de 50°C

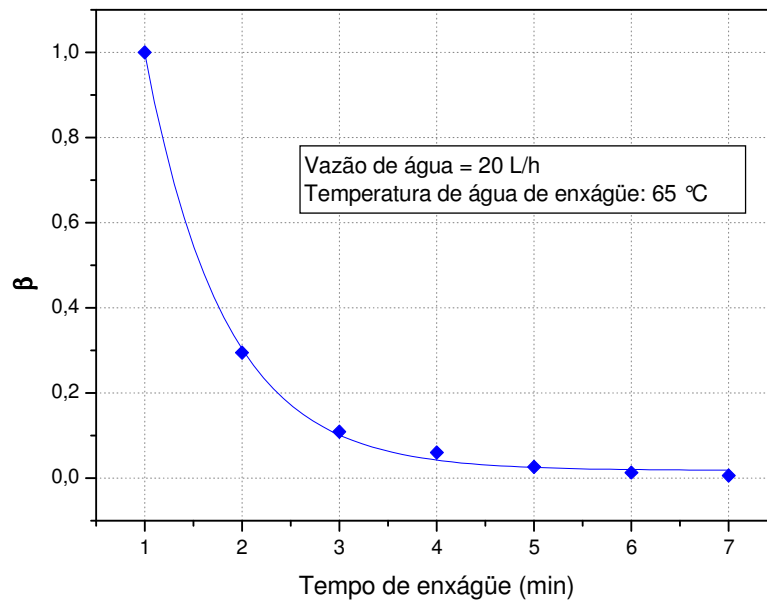


GRÁFICO 16 - Variação de β em função do tempo de enxágüe utilizando como parâmetros de escoamento para a água: vazão de 20L/h e temperatura média de 65°C

O modelo matemático traduzido pela equação (7) continua representando as curvas dessas figuras e as constantes α_1 , α_2 e α_3 encontram-se na tabela 3.

TABELA 3 – Valores das constantes α_1 , α_2 e α_3 da equação obtida pela modelagem do processo de remoção de detergente alcalino, assim como os coeficientes de determinação das equações em função da temperatura da água de enxágüe mantendo-se constante a vazão em 20L/h

Temperatura (°C)	$\alpha_1 \cdot 10^2$	α_2	$\alpha_3 \cdot 10^{-1}$	r^2
25	1,211	2,8226	9,499	0,9988
45	0,0985	2,9506	9,142	0,9994
50	1,744	3,1280	8,627	0,9993
60	1,792	3,3666	8,107	0,9991

O gráfico 17 copila de todos os resultados obtidos. Através de sua análise, e considerando os valores de α_1 , α_2 e α_3 , apresentados na tabela 3, verifica-se que, utilizando uma vazão de água de 20L/h, a temperatura pouco afeta o processo de remoção, quando essa variável encontra-se na faixa compreendida entre 25°C e 65°C, pois α_2 varia de 2,82 a 3,37, α_3 de 8,11 a 9,50 e α_1 , desconsiderando o valor da temperatura de 45°C, varia de 1,21 a 1,79.

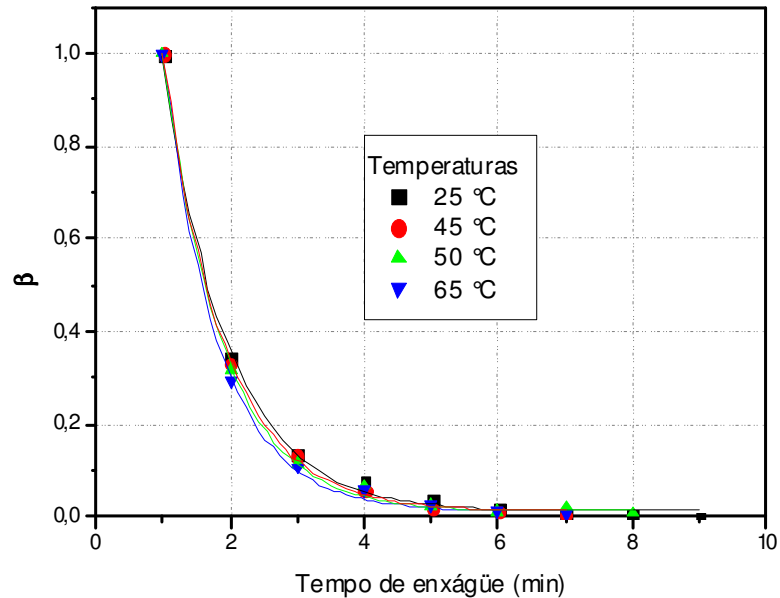


GRÁFICO 17 - Influência da temperatura na variação da concentração de NaOH na água de enxágüe a vazão de 20L/h

O gráfico 18 apresenta a relação entre o maior valor de β possível de ser obtido quando Θ tende a zero em função da temperatura da água da etapa de enxágüe.

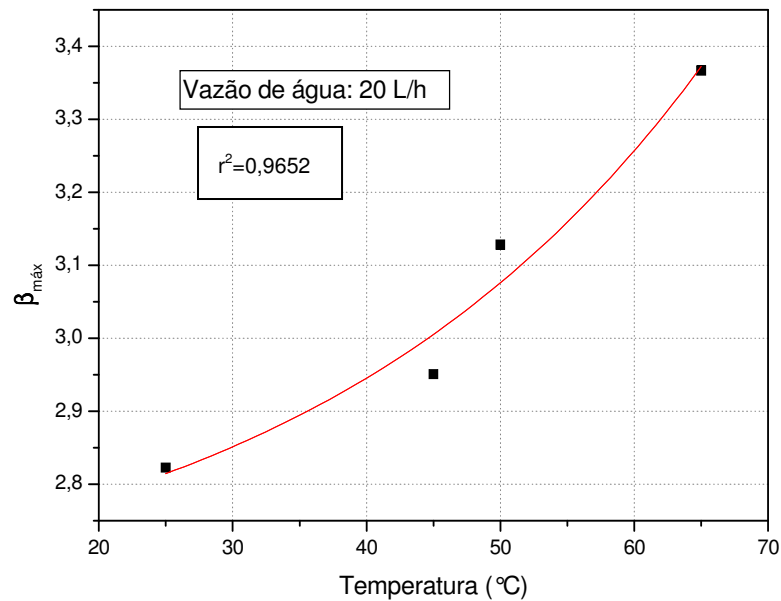


GRÁFICO 18 - $\beta_{\text{máx}}$ possível de ser obtido, no processo de enxágüe para remoção de hidróxido de sódio das superfícies de um trocador de calor de placas, em função da temperatura da água a vazão constante de 20L/h

O modelo matemático, descrito na equação (7), também é válido para representar as variações do valor de β_{MAX} e, conseqüentemente, o potencial de remoção de detergente alcalino pela temperatura testada. Substituindo os parâmetros, pelos dados obtidos do gráfico 18, obtém-se a expressão matemática (9) que representa a variação de β_{MAX} com a temperatura

$$\beta_{\text{MAX}} = 2,6079 + 9,114 \cdot 10^{-2} e^{\left(\frac{T}{30,561}\right)} \quad (9)$$

O gráfico 18 demonstra, que na variação de temperatura estudada com uma vazão pré-fixada de 20L/h, conseguiu-se apenas uma variação de 19% no valor de β_{MAX} . Entretanto, quando se fixou a temperatura em 50°C e variou-se a vazão (ação mecânica) de 10 para 40L/h a variação do valor de $\beta_{\text{máx}}$, conforme verificado no gráfico 12, foi de 450%. Portanto, a vazão influenciou mais na remoção de hidróxido de sódio do que a temperatura nas faixas estudadas. Assim sendo, por vantagens econômicas, devido a não necessidade de aquecimento, pode-se realizar o enxágüe com água à temperatura ambiente desde que a vazão seja suficientemente alta para remover os resíduos do detergente alcalino.

5. CONCLUSÃO

Seguir a intuição industrial que, o aumento do valor dos parâmetros utilizados de forma indefinida, significa aumento na eficiência do processo, pelo menos se relacionadas às etapas que compõem o processo de higienização, pode acarretar em não efetividade nas operações. Os resultados obtidos, tanto na remoção de detergente alcalino, como na remoção de resíduos de leite, comprovam este fato. Estudos relatados por Jeurnink e Brinkman (1994) corroboram com esta afirmação, demonstrando que o aumento na concentração de álcalis de 1 para 2%, em um detergente utilizado para limpeza de um trocador de calor, propiciou queda nos níveis de higienização.

No estudo da remoção de resíduos de sais de cálcio pela água de pré-lavagem de um trocador de calor de placas, utilizado para pasteurizar leite restituído, observou-se, através do modelo matemático determinado, que aumentar indefinidamente a vazão de escoamento não acarreta em maior eficiência do processo; cabendo aos operadores do equipamento determinar as taxas limítrofes, de forma criteriosa, nas quais não haverá desperdícios e, conseqüente, aumento dos custos do processo.

O processo de remoção de detergente alcalino pela água de enxágüe apresentou para os ensaios nos quais se variou inicialmente a vazão de escoamento da água e, posteriormente, sua temperatura, o mesmo comportamento matemático, o que permite as seguintes avaliações: I) quanto maior for a vazão de escoamento de água, mais rapidamente será removido o detergente alcalino; II) a temperatura da água de enxágüe pouco afeta a cinética de remoção. Dessa forma, cabe aos operadores responsáveis do processo definirem, de acordo com suas limitações operacionais, a melhor vazão de processo e trabalhar à temperatura ambiente para evitar desperdícios energéticos.

Uma vez definidos os parâmetros de processo, os modelos matemáticos obtidos podem prever o tempo ideal de processamento para remoção dos sais de cálcio e do detergente, pois a partir de certo instante, pouca variação nas concentrações de resíduos foi verificada na água.

Novos estudos podem ser realizados com utilização de leite integral, e tratamentos térmicos de esterilização (UHT). A maior quantidade de cálcio e taxas de temperatura, acarretam a formação de resíduos mais aderidos, que podem propiciar o aparecimento de uma nova cinética de remoção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, N. J.; MACÊDO, J. A. B. **Higienização na indústria de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 1996. 182 p.

BANSAL, B.; CHEN, X., D. A critical review of milk fouling in heat exchangers. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 5, n. 2, p. 27-33, apr. 2006.

_____. Fouling of heat exchangers by dairy fluids – a review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAT EXCHANGER FOULING AND CLEANING – CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, 6, 2005, Kloster Irsee (Germany). **Anais eletrônicos...** Kloster Irsee (Germany), 2005. Disponível em: <<http://www.services.bepress.com/eci/heatexchanger2005/23>> . Acesso em: 10 dez. 2007.

BARNARD, S. E.; IVKOVICH, M.; CAULEER, P. Processing procedures and sanitation practices to extend the keeping quality of fluid milk. **Dairy, food and environmental sanitation**, v. 12, n. 2, p. 66-68, feb. 1992.

BEHMER, M. L. A. **Tecnologia do leite**. São Paulo: Livraria Nobel, 1999. 320 p.

BEUF, M.; RIZZO, G.; LEULIET, J. C., MÜLLER-STEINHAGEN, H.; YIANTSIOS, S.; KARABELAS, A.; BENEZECH, T. Fouling and cleaning of modified stainless steel plate heat exchangers processing milk products. In: WATKINSON P.; MULLER-STEINHAGEN H.; MALAYERI R. (ed.). ECI CONFERENCE ON HEAT EXCHANGER FOULING AND CLEANING: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, Santa Fe, New Mexico, 2003, p.66-68, v.12.

ELETTRONICAVENETA, MANUAL. **Planta piloto para la pasteurización de la leche y los zumos de cítricos y fruta**. Treviso (IT): [s.n.], [2000?]. 48 p.

FORSYTHE, S. J.; HAYES, P. R. **Higiene de los alimentos, microbiología y HACCP**. 2. ed. Zaragoza: Editorial Acribia, 2002. 489 p.

FRYER, P. J.; CHRISTIAN, G. K.; LIU, W. How hygiene happens: physics and chemistry of cleaning. **International Journal of Dairy Technology**, v. 59, n. 2, p. 76-84, may. 2006.

GALLOT-LAVALLEE, T.; LALANDE, M.; CORRIEU, G. Cleaning kinetics modeling of holding tubes fouled during milk pasteurization. **Journal of Food Process Engineering**, v. 7, p. 123-142, 1984.

GIBSON, H.; TAYLOR, J. H.; HALL, K. E.; HOLAH, J.T. Effectiveness of cleaning techniques used in the food industry in terms of the removal of bacterial biofilms. **Journal of Applied Microbiology**, v. 87, n. 1, p. 41-48, 1999.

GIESE, J. H. Sanitation: the key to food safety and public health. **Food Technology**, v. 45, n. 12, p. 74-80, dec. 1991.

GRANT, C. S.; WEBB, G. E.; JEON, Y. W. A non invasive study of milk cleaning processes: calcium phosphate removal. **Journal of Food Engineering**, v. 20, p. 197-230, 1997.

HOBBS, B. C.; ROBERTS, D. **Higiene y toxicología de los alimentos**. 3. ed. Zaragoza: Editorial Acribia, 1997. 478 p.

HONER, C. Sanitation: front and center. **Dairy Field**, p. 16-23, mar. 1992.

JEURNINK, T. J. M.; BRINKMAN, D. W. The cleaning of heat exchangers and evaporators after processing milk or whey. **Dairy Journal**, Ireland, v. 4, p. 347-368, 1994.

JUN, S; PURI, V. M. Fouling models for heat exchangers in dairy processing: a review. **Journal of food process engineering**, v. 28, n. 1, p.1-34, 2005.

KUNIGK L. **Ação do ácido peracético sobre microrganismos contaminantes do processo cervejeiro**. 1998. 130f. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

LALANDE, M.; TISSIER, J.; CORRIEU, G. Fouling of a plate heat exchanger used in ultra-high-temperature sterilization of milk. **Journal of Dairy Research**, v. 51, p. 557-568, 1984.

LEITÃO, M. F. F. Limpeza e desinfecção na indústria de alimentos. **Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 43, p. 1-35, set. 1975.

MIDDLEMISS, N. E.; NUNES, C. A.; SORENSEN, J. E.; PAQUETTE, G. Effect of a water rinse and a detergent wash on milkfat and milk protein soils. **Journal of Food Protection**, v. 48, p. 257-260, mar. 1985.

MITTELMAN, M. W. Symposium: Biofilms: development and control. **Journal of Dairy Science**, v. 81, p. 2760-2764, 1998.

MROZEK, H. Detergency and disinfection. **Journal of the Society of Dairy Technology**, v. 38, n. 4, p. 119-121, out. 1985.

PARKAR, S. G.; FLINT, S. H.; BROOKS, J. D. Evaluation of the effect of cleaning regimes on biofilms of thermophilic bacilli on stainless steel. **Journal of Applied Microbiology**, v. 96, p. 110-116, 2003.

PASSOS, M. H. C. R. **Estudo da dispersão de depósitos incrustantes obtidos em pasteurizadores de leite por detergentes ácidos e alcalinos: influência do pH, tempo e temperatura de reação.** 1992. 85f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

PREGNOLATTO, W; PREGNOLATTO, N. P. **Normas analíticas do instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análises de alimentos.** 3. ed. São Paulo [s.n], 1985. 533p.

REED, G. H. J. The cleaning process – some definitions of terms. **Dairy, Food and Environmental Sanitation**, v. 12, p. 612-613, sep. 1992.

REINEMANN, D. J.; RABOTSKI, E. Interaction of chemical, thermal and physical actions on the removal of bacteria from milk contact surfaces. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1993, Chicago. **Anais...**Chicago: ASAE, 1993. Paper N° 933536.

SCHMIDT, R. H. Basic elements of equipment cleaning and sanitizing in food processing and handling operations. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1997. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu>>. Acesso em 07 junho 2006.

TURNER, D. W. Hygiene in the dairy industry. **Dairy Industries International**, v. 47, p. 11-17, jul. 1982.

WONG, A. C. L. Biofilms in food processing environments. **Journal of Dairy Science**, v.81, p. 2765-2770, out. 1998.

APÊNDICE

Resultados coletados nos testes de concentração de cálcio às vazões de 10L/h e 15L/h e temperaturas médias de 50°C

TABELA – Concentração de cálcio das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 10L/h e temperatura média de 50°C

Tempo (min)	Concentração de cálcio (mg/L)			
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
1	1261	1563	2015	1613
3	304,8	694,4	485,9	495,1
4	201,3	315,5	226,8	247,9
5	152,9	246,1	203,9	201,0
6	111,9	173,6	127,4	137,6
7	85,67	141,56	97,22	108,1
8	64,44	104,17	86,55	85,05
9	51,15	80,06	73,92	68,38
10	39,53	57,02	53,33	49,96
11	32,99	46,74	56,37	45,37
12	27,84	37,39	53,94	39,73
13	23,37	32,05	46,24	33,89
14	21,77	28,31	36,79	28,96
15	18,03	27,04	35,44	26,84

Fonte: elaborada pelo autor

TABELA – Concentração de cálcio das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 15L/h e temperatura média de 50°C

Tempo (min)	Concentração de cálcio (mg/L)			
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
1	1425	1103	735,6	1088
2	562,2	518,9	346,5	475,9
3	293,3	225,0	212,1	243,5
4	171,4	182,3	144,2	166,0
5	129,1	132,0	89,32	116,8
6	81,64	79,80	81,11	80,85
7	60,10	62,72	61,08	61,30
8	49,72	54,38	50,90	51,67
9	41,71	40,72	44,01	42,14
10	30,08	42,56	43,35	38,66
11	26,07	35,14	36,26	32,49
12	26,01	37,77	26,27	30,02
13	23,32	34,74	26,01	28,02
14	22,66	32,31	27,26	27,41
15	20,82	28,70	23,64	24,39

Fonte: elaborada pelo autor

Resultados coletados nos testes de concentração de cálcio às vazões de 20L/h e 30L/h e temperaturas médias de 50°C

TABELA – Concentração de cálcio das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 20L/h e temperatura média de 50°C

Concentração de cálcio (mg/L)				
Tempo (min)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
1	421,3	1178	1355	985,1
2	260,7	378,3	352,2	330,4
3	67,8	135,0	167,9	123,6
4	53,75	85,73	109,8	83,11
5	48,61	47,33	56,89	50,95
6	30,38	28,27	36,59	31,75
7	23,37	23,20	26,04	24,20
8	18,03	27,33	21,03	22,13
9	17,60	17,67	18,56	17,94
10	17,03	13,40	19,70	16,71
11	16,16	15,70	16,80	16,22
12	15,30	14,80	16,60	15,57
13	16,83	15,50	18,00	16,78
14	15,83	15,20	16,50	15,84
15	17,90	15,50	18,90	17,43

Fonte: elaborada pelo autor

TABELA – Concentração de cálcio das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 30L/h e temperatura média de 50°C

Concentração de cálcio (mg/L)				
Tempo (min)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
1	769,5	787,4	679,9	745,6
1,5	360,5	347,9	302,8	337,1
2	235,5	209,3	164,2	203,0
2,5	179,1	134,3	139,3	150,9
3	95,85	92,04	78,27	88,72
3,5	68,79	67,33	63,02	66,38
4	51,87	47,89	47,10	48,95
4,5	51,41	41,52	42,79	45,24
5	37,88	37,94	37,81	37,88
6	33,17	27,20	27,20	29,19
7	25,21	22,16	25,21	24,19
8	23,22	20,90	21,23	21,78
9	24,21	25,34	24,54	24,70
10	20,90	23,08	20,03	21,34

Fonte: elaborada pelo autor

Resultados coletados nos testes de concentração de cálcio a vazão de 40L/h e temperaturas médias de 50°C

TABELA – Concentração de cálcio das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 40L/h e temperatura média de 50°C

Concentração de cálcio (mg/L)				
Tempo (min)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
0,5	1450	1264	1435	1383
1	415,2	319,2	313,3	349,2
1,5	187,7	142,9	177,3	169,3
2	91,14	82,77	105,74	93,22
2,5	54,82	51,98	58,78	55,20
3	37,20	37,13	35,53	36,62
3,5	27,41	27,34	25,42	26,72
4	22,55	22,28	22,66	22,50
4,5	19,85	19,78	21,48	20,37
5	18,77	17,76	18,52	18,35
6	17,82	18,84	18,65	18,44
7	17,22	18,03	19,31	18,18
8	15,05	17,55	17,60	16,74
9	14,18	16,47	16,55	15,73
10	14,78	17,69	17,80	16,76

Fonte: elaborada pelo autor

Resultados coletados nos testes de alcalinidade às vazões de 10L/h, 15L/h e 20L/h e temperaturas médias de 50°C

TABELA – Alcalinidade e valor β das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 10L/h e temperatura média de 50°C

Tempo (min)	Alcalinidade (g/L)				β
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	
1	3,930	4,432	4,260	4,207	1,00
2	1,639	2,244	1,977	1,953	0,4642
3	0,7952	0,9966	0,9494	0,9137	0,2172
4	0,5247	0,5826	0,5939	0,5671	0,1348
5	0,4047	0,3783	0,4065	0,3965	0,09424
6	0,3030	0,2313	0,2915	0,2753	0,06542
7	0,2240	0,1519	0,2243	0,2000	0,04755
8	0,1663	0,1008	0,1711	0,1461	0,03472
9	0,1239	0,04265	0,1302	0,09892	0,02351
10	0,07921	0,02564	0,09456	0,06647	0,01580

Fonte: elaborada pelo autor

TABELA – Alcalinidade e valor β das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 15L/h e temperatura média de 50°C

Tempo (min)	Alcalinidade (g/L)				β
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	
1	4,400	3,372	3,547	3,773	1,00
2	1,375	0,9123	1,489	1,259	0,3336
3	0,6405	0,4175	0,5908	0,5496	0,1457
4	0,3075	0,2277	0,3652	0,3002	0,07955
5	0,1859	0,1584	0,2385	0,1943	0,05148
6	0,1054	0,1064	0,1814	0,1311	0,03474
7	0,05308	0,06200	0,1250	0,08004	0,02121
8	0,03994	0,04115	0,06836	0,04982	0,01320
9	0,01862	0,02655	0,02880	0,02466	0,006535
10	0,005790	0,01662	0,01266	0,01169	0,003098

Fonte: elaborada pelo autor

TABELA – Alcalinidade e valor β das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 20L/h e temperatura média de 50°C

Tempo (min)	Alcalinidade (g/L)				β
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	
1	2,224	2,651	3,207	2,694	1,00
2	0,9097	0,6408	1,122	0,8910	0,3307
3	0,2115	0,2301	0,4202	0,2873	0,1066
4	0,1001	0,1190	0,2094	0,1429	0,05302
5	0,03496	0,07100	0,1045	0,07016	0,02604
6	0,06930	0,03895	0,03526	0,04784	0,01776
8	0,004582	0,04486	0,0000	0,01648	0,006118

Fonte: elaborada pelo autor

Resultados coletados nos testes de alcalinidade a vazão de 40L/h e temperaturas médias de 50°C

TABELA – Alcalinidade e valor β das amostras analisadas nos testes realizados a vazão de 40L/h e temperatura média de 50°C

Tempo (min)	Alcalinidade (g/L)				β
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	
0,5	3,772	2,158	3,502	3,144	3,526
1	0,9669	0,7309	0,9774	0,8917	1,00
1,5	0,4339	0,2739	0,3392	0,3490	0,3914
2	0,1858	0,1303	0,1280	0,1480	0,1660
2,5	0,09639	0,05346	0,04959	0,06648	0,07455
3	0,04149	0,01187	0,01647	0,02328	0,02611

Fonte: elaborada pelo autor

Resultados coletados nos testes de alcalinidade a temperaturas de 25°C, 45°C e 65°C e vazões médias de 20L/h

TABELA – Alcalinidade e valor β das amostras analisadas nos testes realizados a temperatura de 25°C e vazão média de 20L/h

Alcalinidade (g/L)					
Tempo (min)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	β
1	2,481	2,702	3,307	2,830	1,00
2	0,7991	0,7948	1,317	0,9702	0,3428
3	0,2911	0,3461	0,5380	0,3918	0,1384
4	0,1258	0,1942	0,3114	0,2105	0,07437
5	0,05377	0,1112	0,1671	0,1107	0,03911
6	0,01550	0,04346	0,08507	0,04801	0,01696
7	0,00	0,01785	0,04419	0,02068	0,007307
8	0,00	0,00	0,02539	0,008465	0,002991
9	0,00	0,00	0,006386	0,002129	0,0007522

Fonte: elaborada pelo autor

TABELA – Alcalinidade e valor β das amostras analisadas nos testes realizados a temperatura de 45°C e vazão média de 20L/h

Alcalinidade (g/L)					
Tempo (min)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	β
1	2,419	2,549	2,475	2,481	1,00
2	0,7802	0,8113	0,8677	0,8197	0,3304
3	0,3558	0,2852	0,3383	0,3264	0,1316
4	0,1589	0,1279	0,1601	0,1489	0,06004
5	0,05736	0,03135	0,05783	0,04884	0,01969
6	0,02336	0,000	0,02951	0,01762	0,007103
7	0,004975	0,000	0,01014	0,005037	0,002030

Fonte: elaborada pelo autor

TABELA – Alcalinidade e valor β das amostras analisadas nos testes realizados a temperatura de 65°C e vazão média de 20L/h

Alcalinidade (g/L)					
Tempo (min)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	β
1	2,3210	1,9299	2,2236	2,158	1,00
2	0,6973	0,5444	0,6654	0,6357	0,2946
3	0,2207	0,2148	0,2707	0,2354	0,1091
4	0,1378	0,1123	0,1402	0,1301	0,06030
5	0,06059	0,03996	0,06738	0,05598	0,02594
6	0,02769	0,01984	0,03711	0,02821	0,01307
7	0,01569	0,008707	0,01557	0,01332	0,006173
8	0,001963	0,000	0,009701	0,003888	0,001802

Fonte: elaborada pelo autor