

## **Determinação da influência da altura da lança, vazão de oxigênio e viscosidade da escória na eficiência do “Slag Splashing” em convertedor.**

### **Pesquisador Pós-doutorando:**

Dr. Victor Bridi Telles

Telefone: +55 11 98090 7768

E-mail: [bridi.victor@gmail.com](mailto:bridi.victor@gmail.com)

### **Orientador e Coordenador do Projeto:**

Prof. Dr. José Roberto de Oliveira (IFES)

Telefone: +55 27 98114-9373

E-mail: [jroberto@ifes.du.br](mailto:jroberto@ifes.du.br)

### **1. Resumo**

Os objetivos deste projeto são determinar a influência da altura da lança, vazão de oxigênio e viscosidade da escória na eficiência do Slag Splashing em convertedor.

O Slag Splashing é uma técnica utilizada pelas indústrias siderúrgicas para redução de custos com refratários e aumento da sua vida útil dos fornos [1-3]. Em 1992 a Siderúrgica Indiana Harbour Works of LTV iniciou a utilização do processo o que resultou em recordes mundiais de quantidades de corridas suportadas por um revestimento refratário. Em 1995, o slag splashing foi introduzido na China [4,5]. Já as primeiras publicações relativas a esta técnica datam bem como a adesão de outras siderúrgicas como Baosteel Co., Shougang Co., WISCO, Bethlehem, U.S. Steel, CSN, Eko Stahl e Inland datam de meados da década de 90 [6-15]. Essas empresas foram capazes de aumentar a eficiência operacional com a implementação desta prática [6,8,9,13].

O processo consiste em soprar 20000 ft<sup>3</sup>/ min (~ 566336,93 m<sup>3</sup>) de nitrogênio por meio de uma lança e o gás ao colidir com a superfície do banho, produz uma zona de impacto do jato e faz com que a escória “respingue” nas paredes do convertedor BOF aderindo a suas paredes.

Uma operação padrão de slag splashing contaria, portanto, com quatro etapas: (1) vazamento da corrida anterior, (2) adição de materiais para correção da escória (principalmente dolomita), quando a escória contém muito FeO; (3) sopro de nitrogênio ou uma mistura de nitrogênio com MgO através da lança superior por cerca de 2 a 6 min e; (4) vazamento da escória não projetada [16,17,18].

As áreas alcançadas pela escória dependem de diferentes parâmetros de processo. Geralmente, a escória espalha-se principalmente ao longo da borda da zona de impacto do jato [16]. Os parâmetros que influenciam a eficiência do processo são: ângulos, posição e alturas de lança; a velocidade do jato de nitrogênio; composição dos refratários, composição da escória e suas propriedades físico-químicas, configuração da purga; fluxo do gás de purga; o controle do superaquecimento da escória, etc.

As gotas de escória ao se desprenderem da poça de escória, espirram no revestimento do conversor sob uma combinação de força inercial, força de arrasto e gravidade, Figura 4. Essas gotas se espalham e formam um filme na superfície do revestimento do conversor. A escória aderida ao revestimento do conversor se solidifica gradualmente à medida que a temperatura diminui para

formar uma camada de escória sólida que protege o refratário [18].

A projeção da escória nas paredes do refratário ocorre por ejeção e “lavagem”. Na ejeção, quando a cratera formada pelo jato de gás de alta velocidade atinge um valor crítico as forças de cisalhamento são elevadas e as gotas de escória são ejetadas do banho. Na “lavagem” a agitação do banho é responsável pela escória atingir alturas acima da linha de escória que com viscosidade adequada escorre sobre as paredes do convertedor, “lavando-o” [19,20].

Com o passar do tempo de slag splashing o comportamento da escória se modifica. Altura e regiões de projeção variam bem como a posição da cavidade gerada pelo impacto do jato de gás. No início do slag splashing, a escória aderida ao revestimento do conversor é distribuída de forma desigual. A falta de homogeneidade desaparece à medida que o tempo passa. Além disso, uma maior quantidade de escória adere à parte inferior, enquanto o volume de escória aderida à parte superior do revestimento do conversor diminui.

A variação da projeção da escória em função do tempo do slag splashing é observada tanto em modelos físico como computacionais. Já a variação significativa da taxa de projeção na fase inicial do slag splashing é observada à medida que se forma a cavidade de impacto do jato. Isto ocorre, porque neste estágio, o nível de líquido na região flutua fortemente, e a aleatoriedade da projeção é alta. À medida que o tempo de slag splashing aumenta essas flutuações diminuem.

O aumento da vida útil dos revestimentos refratários por slag splashing é possível com a utilização de refratários de maior qualidade (maior pureza) instalados nos convertedores BOF [7,10]. Zhong et al. [21] concluiu que um menor teor de carbono no revestimento refratário BOF MgO-C é melhor para o processo de slag splashing. Além disso, a parametrização do processo é de vital importância para o aumento da vida útil dos revestimentos. Por exemplo, algumas situações operacionais diminuem a eficiência do processo como variações na altura do fundo de escória que requer modificações na vazão do sopro e altura da lança [1]. Outra dificuldade operacional para aplicação do processo relaciona-se a constante obstrução parcial ou total dos bocais de purga [1].

No início de aplicação da técnica há registros de aumento de vida útil recorde de revestimento em torno de 15.000 – 20.000 corridas e economia anual de cerca de 300000 dólares por mês à época [10,11,22,23]. Na Usina Siderúrgica nº. 3 da An-Shan Iron e Steel Group Corp, por exemplo, o *slag splashing* aumentou a vida útil do revestimento de 1.472 corridas para 8.915 corridas, o consumo de refratário diminuiu de 1,8 para 0,58 kg/ton de aço, a produtividade aumentou de 75,9 para 79,7%, o rendimento do aço aumentou de 3,13 para 4,00 Mt/ano, e o benefício econômico anual reportado foi de cerca de US\$ 3,4 milhões [16]. Na Long-steel a vida útil do revestimento do conversor foi aumentada de 4.000 para 15.000 corridas, com produtividade atingindo 87%[5]. Wang et al. [24] reporta um aumento de 12000 para 15000 corridas. Este aumento de vida útil só é possível quando os parâmetros de *slag splashing* são otimizados e monitorados.

A utilização do slag splashing apesar de vantajosa em termos de aumento da vida útil dos revestimentos refratários deve ser aplicada apenas quando for possível monitorar e controlar o crescimento da camada de escória no fundo do convertedor, uma vez que o crescimento descontrolado resulta em uma redução do volume interno do conversor e produz desvantagens em termos operacionais [29].

## 2. Introdução e Justificativa

O Slag Splashing é considerado uma das técnicas de reparo preventivo mais modernas da atualidade, consistindo, segundo Lima et al. (2000), de uma proteção refratária de BOF que é realizada através da projeção de escória nas paredes do seu vaso através de um sopro de nitrogênio (N<sub>2</sub>) a alta pressão e vazão advindas de uma linha, que pode ser acoplada a lança de oxigênio (O<sub>2</sub>). Ainda, no processo pode ou não ocorrer a adição de materiais, como a dolomita

(CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>) ou a cal (CaO) com o intuito de corrigir as condições da escória. De acordo com Luomala et al. [26], a cobertura que essa escória fornece depois de solidificada, se torna uma espécie de “camada consumível de revestimento” e pode trazer como benefício uma redução no consumo de outros tipos de reparos e de custos operacionais, além de aumentar a vida útil (tempo disponível) do convertedor.

Mills et al. (2005) [20] aponta que muitas variáveis devem ser consideradas no processo, desde aquelas relacionadas à qualidade da escória até aspectos operacionais. Dentre elas, citam-se a formação de escória durante o sopro, sua basicidade, densidade e viscosidade; e em termos operacionais, têm-se a altura da lança, o ângulo de furo da lança, o número de furos e a vazão do sopro.

Uma das grandes dificuldades encontradas na utilização do processo Slag Splashing é a padronização ideal diante de condições e necessidades de cobertura diferenciadas. Nem sempre se tem escórias com viscosidades adequadas ao processo e nem sempre se quer recobrir as mesmas regiões do refratário do BOF, pois condições operacionais podem gerar desgastes diferentes em locais específicos. Dessa forma, condições ótimas para a prática do Slag Splashing, visando uma cobertura mais efetiva, devem ser identificadas, definindo-se os valores mais indicados para os parâmetros operacionais, geométricos e viscosidade de escória.

O Espírito Santo sempre apresentou indicadores econômicos que o colocaram em posição de destaque no Brasil. Isto se deve, principalmente, ao setor minero-metalúrgico instalado no Estado, que possui unidades instaladas dos maiores grupos produtores de aço do mundo. O crescimento dos preços dessas *commodities* e aço, conjugado ao aumento da produção, pode elevar o valor adicionado ao PIB pelo setor supracitado.

Nota-se que o setor siderúrgico é visto como um dos principais portadores do futuro, visto que, possui potencial de colocar o Estado em uma posição ainda mais competitiva em nível nacional e internacional. No entanto, isto só será possível com o avanço em inovação e tecnologia. Destaca-se ainda, que o setor (no estado) é extremamente carente de recursos humanos especializado, como é de conhecimento das empresas. Existem raros centros de excelência no país, que formam pesquisadores na área de processos de fabricação de ligas ferrosas.

Diante do exposto, o Laboratório de Modelo a Frio do PROPEMM no campus Vitória, elevará o potencial de formação de recursos humanos e resultados em pesquisa para aumentar competitividade do setor a nível mundial. Neste sentido, o estudo tem o objetivo de determinar a influência da altura da lança, vazão de oxigênio e viscosidade da escória na eficiência do Slag Splashing em convertedor.

### **3.Objetivos**

Determinar a influência da altura da lança, vazão de oxigênio e viscosidade da escória na eficiência do Slag Splashing em convertedor.

#### **3.1 Objetivos Específicos:**

- Estudar a Influência da posição da lança na projeção de slag splash no convertedor LD;
- Estudar a Influência da vazão da lança na projeção de slag splash no convertedor LD;
- Estudar a Influência da viscosidade da escória na projeção de slag splash no convertedor LD.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Introdução

O Slag Splashing é uma técnica utilizada pelas indústrias siderúrgicas para redução de custos com refratários e aumento da sua vida útil dos fornos [1-4]. Em 1992 a Siderúrgica Indiana Harbour Works of LTV iniciou a utilização do processo o que resultou em recordes mundiais de quantidades de corridas suportadas por um revestimento refratário. Em 1995, o slag splashing foi introduzido na China [5]. Já as primeiras publicações relativas a esta técnica datam bem como a adesão de outras siderúrgicas como Baosteel Co., Shougang Co., WISCO, Bethlehem, U.S. Steel, CSN, Eko Stahl e Inland datam de meados da década de 90 [6–15]. Essas empresas foram capazes de aumentar a eficiência operacional com a implementação desta prática [6,8,9,13].

O processo consiste em soprar 20000 ft<sup>3</sup>/ min (~ 566336,93 m<sup>3</sup>) de nitrogênio por meio de uma lança e o gás ao colidir com a superfície do banho, produz uma zona de impacto do jato e faz com que a escória “respingue” nas paredes do convertedor BOF aderindo a suas paredes (Figura 1) [16].

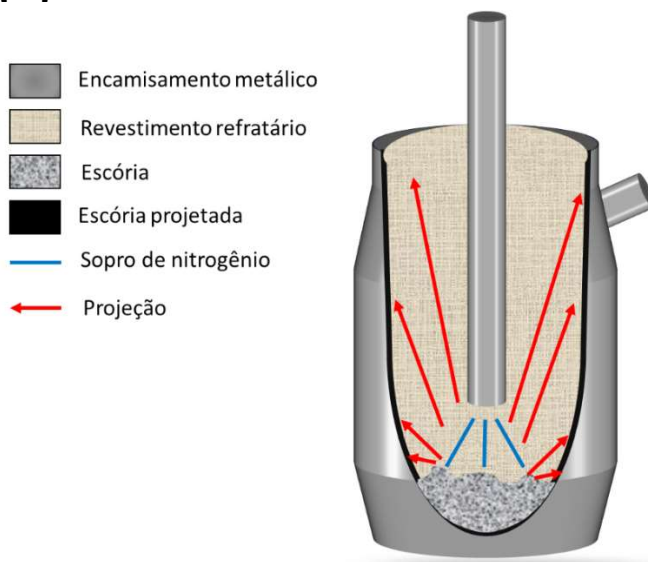


Figura 1 - Diagrama esquemático do processo slag splashing

Uma operação padrão de slag splashing contaria, portanto, com quatro etapas: (1) vazamento da corrida anterior, (2) adição de materiais para correção da escória (principalmente dolomita), quando escória contém muito FeO; (3) sopros de nitrogênio ou uma mistura de nitrogênio com MgO através da lança superior por cerca de 2 a 6 min e; (4) vazamento da escória não projetada

[1,17,18].

As áreas alcançadas pela escória dependem de diferentes parâmetros de processo. Geralmente, a escória espalha-se principalmente ao longo da borda da zona de impacto do jato [16]. Os parâmetros que influenciam a eficiência do processo são: ângulos, posição e alturas de lança, a velocidade do jato de nitrogênio, composição dos refratários, composição da escória e suas propriedades físico-químicas, configuração da purga, fluxo do gás de purga, o controle do superaquecimento da escória, etc.

As gotas de escória ao se desprenderem da poça de escória, espirram no revestimento do conversor sob uma combinação de força inercial, força de arrasto e gravidade, (Figura 1). Essas gotas se espalham e formam um filme na superfície do revestimento do convertedor. A escória aderida ao revestimento do convertedor se solidifica gradualmente à medida que a temperatura diminui para formar uma camada de escória sólida que protege o refratário [18]. Este movimento da escória dentro do convertedor é esquematizado na Figura 2.

A projeção da escória nas paredes do refratário ocorre por ejeção e “lavagem”. Na ejeção, quando a cratera formada pelo jato de gás de alta velocidade atinge um valor crítico as forças de cisalhamento são elevadas e as gotas de escória são ejetadas do banho. Na “lavagem” a agitação do banho é responsável pela escória atingir alturas acima da linha de escória que com viscosidade adequada escorre sobre as paredes do convertedor, “lavando-o” [20].

Com o passar do tempo de slag splashing o comportamento da escória se modifica. Altura e regiões de projeção variam bem como a posição da cavidade gerada pelo impacto do jato de gás. No início do slag splashing, a escória aderida ao revestimento do convertedor é distribuída de forma desigual. E a falta de homogeneidade desaparece à medida que o tempo passa. Além disso, uma maior quantidade de escória adere à parte inferior, enquanto o volume de escória aderida à parte superior do revestimento do convertedor diminui.

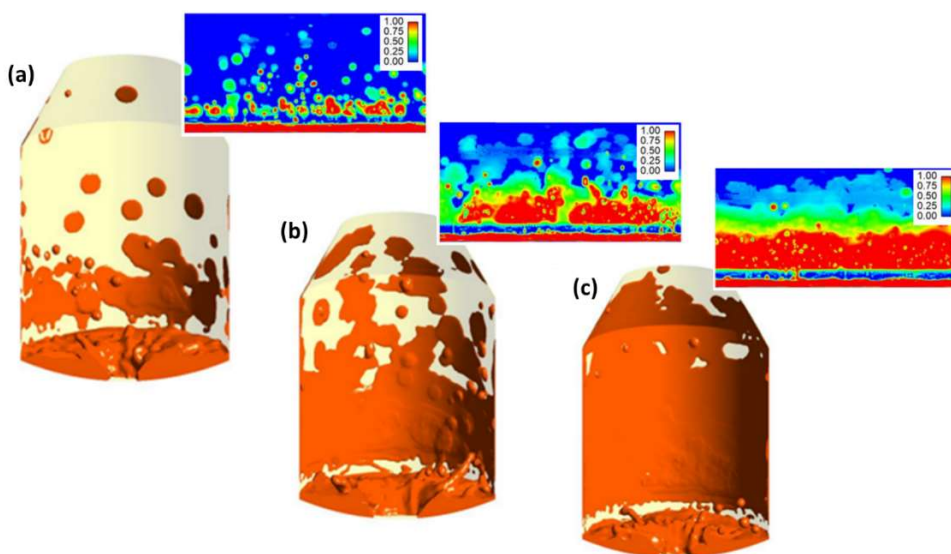


Figura 2 - Efeito do tempo de slag splashing sobre o comportamento do banho de escória. (a) 5 s; (b) 15 s; (c) 30 s. Adaptado de [18].

A variação da projeção da escória em função do tempo do slag splashing é observada tanto em modelos físico como computacionais (Figura 3). Já a variação significativa da taxa de projeção na fase inicial do slag splashing é observada à medida que se forma a cavidade de impacto do jato. Isto ocorre, porque neste estágio, o nível de líquido na região flutua fortemente, e a aleatoriedade da projeção é alta. À medida que o tempo de slag splashing aumenta essas flutuações diminuem.

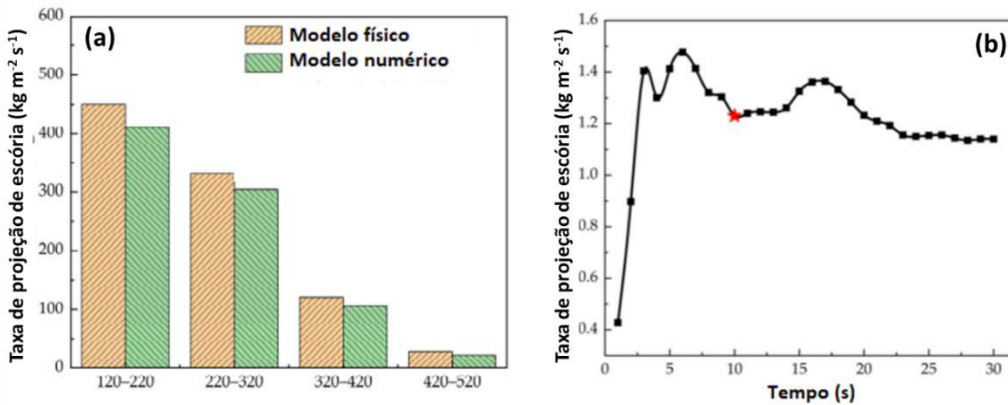


Figura 3 - Flutuações da densidade da escória em função do tempo de slag splashing (a) comparação entre o modelo físico e o numérico; (b) comportamento no início do processo. Adaptado de [18]

O aumento da vida útil dos revestimentos refratários por slag splashing é possível com a utilização de refratários de maior qualidade (maior pureza) instalados nos convertedores BOF [7,10]. Zhong et al. [21] concluiu que um menor teor de carbono no revestimento refratário BOF MgO-C é melhor para o processo de slag splashing. Além disso, a parametrização do processo é de vital importância para o aumento da vida útil dos revestimentos. Por exemplo, algumas situações operacionais diminuem a eficiência do processo como variações na altura do fundo de escória que requer modificações na vazão do sopro e altura da lança [1] (Figura 4). Outra dificuldade operacional para aplicação do processo relaciona-se a constante obstrução parcial ou total dos bocais de purga [1].

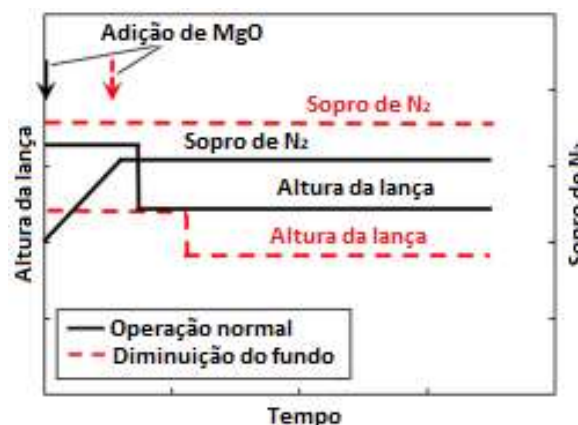


Figura 4 - Variação dos padrões de slag splashing para diferentes alturas de fundo do convertedor. Adaptado de [1]

No início de aplicação da técnica há registros de aumento de vida útil recorde de revestimento em torno de 15.000 – 20.000 corridas e economia anual de cerca de 300000 dólares por mês à época [10,11,22,23]. Na Usina Siderúrgica nº 3 da An-Shan Iron e Steel Group Corp, por exemplo, o *slag splashing* aumentou a vida útil do revestimento de 1.472 corridas para 8.915 corridas, o consumo de refratário diminuiu de 1,8 para 0,58 kg/ton de aço, a produtividade aumentou de 75,9 para 79,7%, o rendimento do aço aumentou de 3,13 para 4,00 Mt/ano, e o benefício econômico anual reportado foi de cerca de US\$ 3,4 milhões [16]. Na Long-steel a vida útil do revestimento do conversor foi aumentada de 4.000 para 15.000 corridas, com produtividade atingindo 87%[5]. Wang et al. [24] reporta um aumento de 12000 para 15000 corridas. Este aumento de vida útil só é possível quando os parâmetros de *slag splashing* são otimizados e monitorados.

A utilização do slag splashing apesar de vantajosa em termos de aumento da vida útil dos revestimentos refratários deve ser aplicada apenas quando for possível monitorar e controlar o crescimento da camada de escória no fundo do convertedor, uma vez que o crescimento descontrolado resulta em uma redução do volume interno do conversor e produz desvantagens em termos operacionais [29].

## 4.2 Modelos físicos

Em meados dos anos 90 e início dos anos 2000 os primeiros modelos físicos sobre slag splashing são propostos. O primeiro modelo físico para slag splashing em um conversor BOF foi um modelo bidimensional utilizando um único jato inclinado. Este modelo mostrou que maiores ângulos de lança e alturas aumentam a projeção da escória, assumindo que todas as outras características de jato são constantes. Em seguida um modelo à frio foi proposto para investigar os efeitos de parâmetros como números de bocais, ângulos dos bocais, velocidade de fluxo de gás, profundidade do banho, viscosidade da escória e altura de lança. E foi observado que aumentando-se a altura da lança aumenta-se a quantidade de projeções na região inferior e que a quantidade de escória que atinge a região superior com aumento do ângulo do bocal era menor [26,27]. O efeito do aumento da pressão do gás superior sobre a projeção da escória também foi avaliado [27].

Para a construção de modelos, a análise dimensional estabelece leis de escala que permitem converter os dados experimentais de um modelo em informação de projeto para situações operacionais. Essas leis podem ser aplicadas desde que haja semelhança entre o modelo e a condição operacional. Logo, os testes no modelo são similares a condição operacional desde que haja similaridade geométrica e desde que todos os parâmetros adimensionais possuam os mesmos valores correspondentes.

## 4.3 Características da escória

As características da escória são por muitas vezes avaliadas variando-se a mistura de líquidos utilizadas nos modelos físicos. Análises como variação da viscosidade, tensão superficial, podem ser realizadas modificando-se a natureza do líquido utilizado, proporção das misturas ou fração de

sólidos. A Tabela 1 apresenta as principais misturas utilizadas em modelos físicos para *slag splashing*.

Tabela 1 – Misturas utilizadas para simulação de escórias em modelos físicos.

Líquido	Proporções	Ref
Água		[5,26,28]
Água + glicerol	30%, 78 %; 88%	[16,18,26,27]
Água + óleo vegetal		[24]
Óleo de soja		[31]
Óleo de soja + polipropileno	5 a 30 %	[31]

#### 4.4 Parâmetros que influenciam o processo do SLAG SPLASHING

A Figura 4? apresenta um diagrama esquemático com os fatores que afetam a eficiência do processo slag splashing estudados na literatura.

A Figura 16 apresenta um diagrama esquemático com os fatores que afetam a eficiência do processo slag

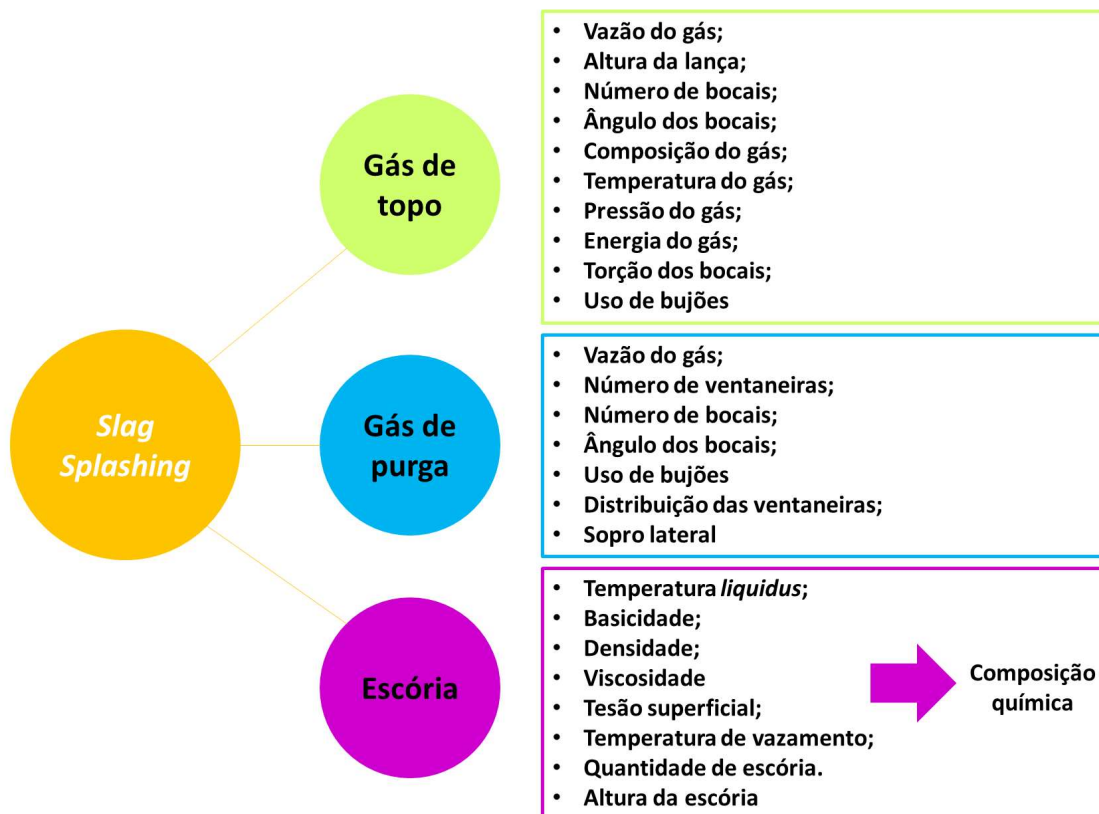


Figura 4 – Fatores que afetam a eficiência do processo slag splashing.



É importante salientar que apesar dos esforços realizados para otimização do slag splashing, o processo não é uniforme. Isto ocorre devido a característica transiente e instável do jato da lança próximo a zona de impacto do jato [19]. Por exemplo, ao fixarmos a atenção em um ponto nas paredes do conversor, à medida que se desloca para posições mais altas observa-se que a quantidade de escória diminui abruptamente [5].

#### 4.5 Viscosidade, densidade, fração de sólido e composição química da Escória

A viscosidade da escória tem um impacto direto no comportamento do fluxo de escória projetada [25]. A composição química afeta a viscosidade da escória. Para o sistema  $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$  em equilíbrio com Fe observou-se que em baixas concentrações de  $\text{SiO}_2$ , a viscosidade aumenta à medida que a fração  $\text{CaO/FeO}$  aumenta, e em altas concentrações de  $\text{SiO}_2$ , primeiro diminui e depois aumenta à medida que a fração  $\text{CaO/FeO}$  cresce [30], conforme observado na Figura 5.

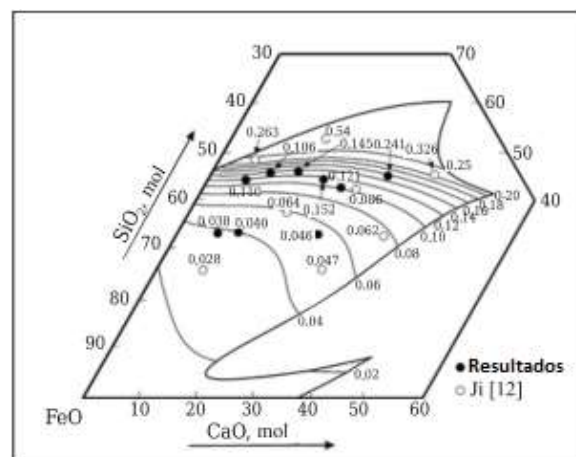


Figura 5 – Linhas de isoviscosidade no sistema  $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$  em equilíbrio de Fe a 1673 K. Adaptado de [36]

Para escórias em temperaturas que variam de 1500 a 1650°C observou-se um aumento na fluidez da escória como resultado do teor crescente de FeO. Além disso, um aumento na temperatura causa o mesmo efeito sobre a fluidez. Uma diminuição na viscosidade é o resultado da despolimerização das cadeias de silicato devido ao aumento basicidade da escória. Um aumento na viscosidade pode ser o resultado de isolamento de compostos sólidos como  $3\text{CaO.MgO.SiO}_2$  (merwinita),  $2\text{CaO.MgO.2SiO}_2$ ,  $2\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$ , e  $2\text{CaO.SiO}_2$  (belita) [36].

As simulações conduzidas por Leão et al [19], também mostram que quanto maior a densidade da escória menor é a taxa de *slag splashing* (Figura 6). A menor viscosidade da escória leva ao aumento da profundidade de penetração do jato de gás e maior projeção. No entanto, uma escória fluida tende a escorrer pela parede do conversor, resultando em uma fina camada de revestimento na superfície do refratário. Portanto, o mecanismo de ejeção é relevante para valores de baixa viscosidade, enquanto o mecanismo de “lavagem” torna-se significativo para viscosidades elevadas [34].

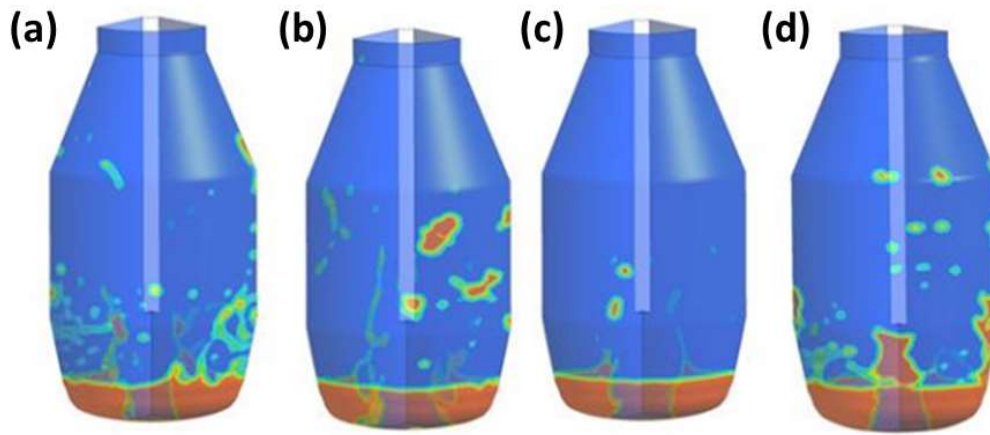


Figura 6 – Projeção de escórias nas paredes do convertedor utilizando uma escória com viscosidade de  $0,058 \text{ N s m}^{-2}$  e densidade variável de (a)  $3490 \text{ kg m}^{-3}$  e (b)  $2500 \text{ kg m}^{-3}$  e; viscosidade de  $1 \text{ N s m}^{-2}$  e densidade variável de (c)  $3490 \text{ kg m}^{-3}$  e (d)  $2500 \text{ kg m}^{-3}$ . Adaptado de [19]

Quando a viscosidade da escória aumenta, a quantidade de escória espalhada no convertedor diminui. Um aumento na viscosidade da escória pode resultar em uma diminuição na profundidade da zona de impacto. A escória não pode ser facilmente projetada e, a quantidade de escória projetada no forno diminui. Além disso, um pouco de escória é projetada principalmente na linha de escória e a quantidade de escória projetada na zona do munhão e na zona do cone é muito pequena. Portanto, diminuir a viscosidade da escória em uma determinada faixa resulta em aumento da quantidade de escória revestindo o convertedor, o que é vantajoso em termos de proteção do refratário. Por outro lado, aumentar a viscosidade da escória em uma determinada faixa resulta na diminuição da taxa de escoamento da escória nas paredes do forno e no aumento do tempo de interação entre a escória e o refratário, o que também é vantajoso para o processo. Portanto, a viscosidade da escória deve ser otimizada.

Segundo o modelo de Liu et al. [16], a correlação entre a taxa de *slag splashing* ( $A$ ,  $\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), altura da lança ( $h$ , mm) e viscosidade da escória ( $\mu$ ,  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) também pode ser obtida por regressão:

$$A = 2,4146 - 0,0004 \mu^2 - 0,0071 \mu h + 0,3558 \mu + 0,0088 h^2 + 0,445 h \dots$$

Pelas simulações de Leão et al. a correlação entre a taxa de *slag splashing* ( $A$ ,  $\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), altura da lança ( $h$ , mm) e viscosidade da escória ( $\mu$ ,  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) é dada por:

$$A = -0,6 - 0,286 \mu + 1,42 h - 0,00371 h^2 + 0,000572 \mu^2 + 0,000953 \mu h$$

#### 4.6 Altura da lança

Mantendo-se o nível de escória constante e medindo-se a espessura da escória projetada, observa-se que a altura da lança é o parâmetro mais significativo governando a ação do jato na superfície da escória, que em por sua vez, controla a altura da projeção e a espessura do revestimento [24,25]. A Figura 7, mostra o efeito da altura da lança sobre o *slag splashing*.

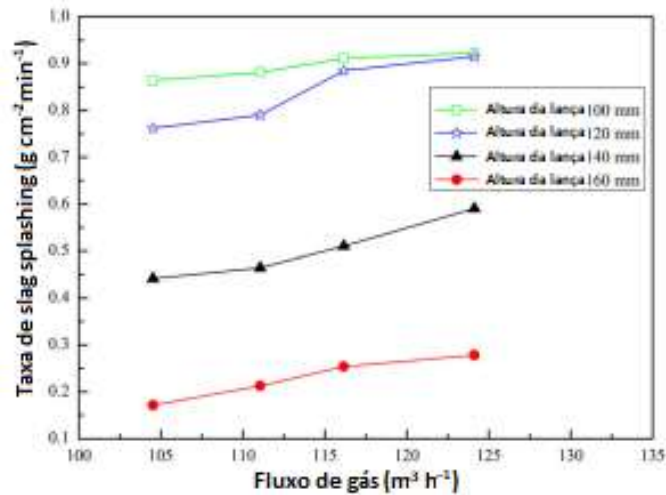


Figura 7 – Efeito da altura da lança e fluxo de gás na taxa de slag splashing. Adaptado de [24].

Obseva-se que com a diminuição da altura da lança aumenta a quantidade de escória aderida. Principalmente quando a posição da lança muda de 0,14 para 0,12 m isso devido a maior energia de agitação [24].

Quando a altura da lança aumenta, a quantidade de escória espalhada em todo o forno aumenta gradativamente, até um determinado valor máximo a partir do qual diminui [5,16,25]. Se a altura da lança é menor que a ideal, o jato de gás colide com a superfície do banho em alta velocidade (estado de penetração). Nesta condição, a profundidade da zona de impacto é maior que a do banho. O jato de gás penetra na escória líquida até o fundo do forno, resultando em perda de energia do jato de gás, o que é desvantajoso para o processo de *slag splashing*. A quantidade de escória aderida nas paredes do revestimento será muito pequena porque o jato de gás não conseguirá empurrar a escória líquida para o lado, produzindo turbulência direcionada para o jato da lança.

Segundo o modelo físico de Liu et al. [16] a correlação entre a taxa de *slag splashing* no forno ( $A$ ,  $g\ m^{-2}\ s^{-1}$ ), altura da lança ( $h$ , mm), taxa de fluxo de gás soprado no topo ( $Q_T$ ,  $Nm^3\ h^{-1}$ ) e a quantidade de escória, ou seja, a razão entre o peso total da escória e o peso total do aço no conversor ( $K$ , %) pode ser obtida pela regressão:

$$A = 114,6474 - 0,0003 K^2 Q_T + 0,0001 K^2 h^2 - 0,002 K^2 h + 0,0172 K^2 - 0,0042 K Q_T h + 0,0575 K Q_T - 0,003 K h^2 + 0,0001 K Q_T h^2$$

A altura operacional ideal da lança não é a mesma do modelo físico. No decorrer do slag splashing operacional, a temperatura da escória é drasticamente diminuída e a viscosidade da escória é rapidamente aumentada. Essa mudança de temperatura e de viscosidade da escória não são consideradas no modelo físico devido às limitações das condições experimentais. Então, quando a altura otimizada do modelo físico é aplicada no processo operacional, a altura da lança deve ser modificada por um fator de correção. O fator de correção deve ser menor para escória de viscosidade mais alta e maior para escória de viscosidade mais baixa [16].

#### 4.7 Vazão de gás da lança

À medida que a taxa de fluxo de gás da lança aumenta, a quantidade de escória espalhada no

forno aumenta rapidamente. Isto porque a energia cinética da gota de escória aumenta [24]. Para uma certa condição de *slag splashing*, um aumento na vazão de gás pode resultar em: (1) um aumento na força com a qual o jato de gás colide com a superfície do banho e agita o banho, (2) um aumento na profundidade da zona de impacto do jato e, (3) um aumento na quantidade e na altura da escória que revestiu as paredes do forno.

A vazão de gás soprado pelo topo deve ser suficiente para garantir um *slag splashing* eficiente. Fluxos muito elevados levam a perda de energia das gotas de escória devido às colisões elásticas, aumento do tempo de gestação e aumento do consumo de modificadores de escória [24].

A otimização da vazão de gás em relação geometria do convertedor pode ser obtida a partir da seguinte relação [20]:

$$\frac{Hh}{D} = 16,24 + 0,6 \left( \frac{Qh}{d} \right)^{0,33} t \quad (1)$$

Onde, h representa a altura do bocal sobre a linha de escória (m); H, altura e D diâmetro do convertedor (m); Q, taxa de *slag splashing* (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) e; t tempo de *slag splashing* (s).

## 5. Metodologia

### 5.1 Testes em Laboratório de Simulação a Frio

Para atender as novas pesquisas sobre a simulação de processos, o PROPEMM está montando o **LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO A FRIO** afim de realizar simulações dos processos siderúrgicos que dependem de transporte de massa de seus componentes.

O laboratório de simulação a frio permitirá estabelecer convênios de pesquisa entre o Polo de Inovação - IFES e a ArcelorMittal, em conjunto com o PROPEMM, através de projetos de pesquisa na forma de fomento.

O modelo a frio tem por finalidade buscar aproximar ao máximo do processo industrial, porém, sob temperaturas bastante inferiores. Na modelagem a frio de um convertedor LD, o refratário é geralmente substituído por uma estrutura de acrílico, e utiliza-se óleo de soja com a finalidade de simular a escória. Normalmente, o óleo de soja, bem como o óleo de parafina, é o fluido utilizado para representar a escória líquida, devido às suas propriedades, tais como viscosidades cinemáticas, serem semelhantes. A Figura 8 mostra o Modelo à Frio do Convertedor montado.



*Figura 8. Modelo em acrílico com lança para injeção de ar comprimido.*

## **5.2 Testes para estudar a influência da posição e vazão da lança na projeção de slag splashing no convertedor LD**

A escolha do óleo de soja para a simulação a frio foi devida as suas características físicas serem semelhantes à da fase líquida da escória proveniente do refino oxidante, e isso assegura uma similaridade dinâmica entre os testes e a prática industrial, que é um dos alvos do estudo. Na simulação do Slag Splashing, será utilizado um compressor de 22,5kW almejando as vazões entre  $65\text{m}^3/\text{h}$  e  $160\text{m}^3/\text{h}$ . Para controlar as vazões do jato da lança serão instalados e utilizados medidores de vazão.

A projeção da escória será medida através da adição de um corante no óleo de soja, que deixará uma marcação no acrílico. Com base nesta marcação será medida a altura máxima e a área máxima da escória projetada.

Também serão instaladas câmeras de alta resolução que irão registrar a área projetada, características físicas da projeção e até estimar a sua velocidade. As distâncias sola-lança (DSL) irão variar entre 450 mm e 650 mm, alturas essas correspondentes às alturas de práticas industriais.

## **5.3 Testes para estudar a influência da viscosidade da escória na projeção de slag splashing no convertedor LD**

Partículas de polipropileno já foram utilizadas em experimentos a frio para contagem de inclusões. Baseando-se nesse fato e na sua fácil disponibilidade, o material foi escolhido para simular a variação de viscosidade da escória. Assim, podem-se simular escórias da prática industrial, características do final do refino oxidante, contendo diferentes frações de sólidos. A densidade das partículas de polipropileno é medida pelo método de Arquimedes, e a partir do valor obtido calcula-se a quantidade de partículas a serem adicionadas ao óleo, de modo a obter a fração de

sólido do sistema, que será determinante no valor da viscosidade.

Os testes terão alterações de viscosidade obedecendo sempre a mesma sequência de altura da lança e vazão, colocando os sistemas sob as mesmas condições a cada teste. Uma réplica será considerada para melhor confiabilidade dos dados, obedecendo ao quesito de imparcialidade entres as repetições. Uma câmera frontal será responsável pela captação das imagens, que permitirá posterior análise visual e descrição do espalhamento do material. Os testes ocorrerão guiando-se pela sequência apresentada na matriz de teste mostrada na Tabela 2.

*Tabela 2 – Matriz de teste (Fonte: Autor).*

DSL (mm)	Vazão de N2 (NI/min)	COMPOSIÇÃO ESCÓRIA
450	65	100% Líquida
550	100	
650	160	
450	65	90% Líquida + 10% Sólido
550	100	
650	160	
450	65	85% Líquida + 15% Sólido
550	100	
650	160	

Outra câmera será fixada ao fundo do BOF em acrílico, e após os ensaios, com as imagens em câmera lenta, será possível analisar o comportamento do jato e verificar a possibilidade de descrição e medição da penetração. Para o caso de impacto do jato na área do fundo, será calculada a superfície. Com esses dados será possível descrever uma correlação da área impactada no fundo versus o comportamento do espalhamento do material realizada pela câmera lateral, descrita anteriormente.

Para os testes laboratoriais, cuja infraestrutura a ser utilizada será o laboratório de Simulação A Frio do PROPEMM, os seguintes equipamentos e insumos estarão disponíveis, não sendo necessário adquiri-los: (1) Conversor em acrílico; (2) Lança de sopro; (3) Compressor; (4) Mangueiras flexíveis; (5) Câmera fotográfica. Já as (6) Câmeras Go Pro; (7) Óleo de soja; (8) Partículas de Polipropileno e (9) Balança, ainda serão adquiridos, mas o recurso financeiro para tal já foi viabilizado através do Edital FAPES PROPEMM. Dos itens mencionados na lista acima, quando necessário, deverá ser realizada a reposição do insumo óleo de soja.

#### **5.4 Simulação termodinâmica**

As simulações termodinâmicas serão realizadas com a ferramenta “FactSage” para previsão das fases presentes nas escórias dos testes industriais, de modo a quantificar a fração de sólidos bem como a composição da fase líquida da escória. A partir de dados da composição da escória e temperatura, podem ser realizados os cálculos termodinâmicos. Uma vez conhecida a composição

da fase líquida da escória e a fração de sólido, calcula-se a viscosidade do líquido pelo módulo “Viscosity”, e a viscosidade efetiva pode ser obtida a partir de modelos como a equação de Einstein-Roscoe, incluindo-se a fração volumétrica de sólidos prevista pela termodinâmica. Estas simulações serão realizadas no laboratório de Termodinâmica Computacional do PROPEMM, usando o software “FactSage”.

## 6. Resultados e impactos esperados

- Determinar a influência da altura da lança, vazão de oxigênio e viscosidade da escória na eficiência do Slag Splashing em convertedor;
- Aumentar a quantidade de defesas de mestrado e de publicação de artigos no PROPEMM;
- Consolidar o Laboratório de Simulação a Frio.

## 7. Viabilidade Técnica

Todo o equipamento e material para execução deste trabalho já foram ou serão adquiridos com verba recebida pelo Edital FAPES PROPEMM.

## 8. Cronograma de atividades

Atividade 1- Aquisição dos equipamentos e materiais de consumo faltantes (Câmeras Go Pro; Óleo de soja; Partículas de Polipropileno e Balança);

Atividade 2- Realização de testes para Determinar a influência da altura da lança na eficiência do Slag Splashing em convertedor;

Atividade 3- Realização de testes para Determinar a influência da vazão de oxigênio na eficiência do Slag Splashing em convertedor;

Atividade 4- Realização de testes para Determinar a influência da altura da viscosidade da escória na eficiência do Slag Splashing em convertedor;

Atividade 5- Elaboração de relatório Técnico e artigos.

Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Atividade 1	X	X	X	X	X	X						
Atividade 2						X	X					
Atividade 3								X	X			
Atividade 4										X	X	X
Atividade 5										X	X	X



## **INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

### **PROPOSTA DE PLANO DE TRABALHO A SER EXECUTADO PELO PROFESSOR VISITANTE**

#### **Projeto:**

**Super Ligas de Co-Cr-Fe/ Inconel 625 Tratadas por Nitretação a Plasma: caracterização microestrutural e propriedades tribológicas.**

#### **Objetivos:**

O objetivo da presente pesquisa é estudar os efeitos do tratamento termoquímico de carbonitretação a plasma na redução ao desgaste, analisando seu comportamento tribológico e a formação da camada de fase S na superliga de cobalto Co50-Cr30-Fe20 solubilizada e recristalizada, e para a superliga Inconel 625, o objetivo é estudar a cinética de formação da fase S e analisar o comportamento tribológico em função da temperatura e do tempo de nitretação.

#### **Justificativa do plano de trabalho proposto para o professor visitante**

Em 2021, aproximadamente 42% do cobalto consumido nos Estados Unidos foi usado em superligas, que podem ser aplicadas em diversos segmentos como aeronáutica, indústria química, petroquímica e na siderurgia (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2022). Não obstante a gama de utilizações das superligas de cobalto, existe a necessidade de conciliar a demanda global com as reservas do metal.



Como parte do consumo do cobalto e destinado as superligas utilizadas em segmentos industriais, uma das formas de melhorar sua eficiência de utilização pode ser por aplicação de técnicas que aumentem a resistência ao desgaste, aumentando a vida útil dos equipamentos. Isso porque falhas precoces de equipamentos podem ser ocasionadas por danos causados por desgaste em seus componentes, aumentando o custo de manutenção e o consumo energético, além de perdas para a produção. Nesse contexto, a compreensão do comportamento tribológico dos materiais aliada a engenharia de superfícies e importante não apenas para o aprimoramento das propriedades superficiais dos materiais, mas também para ampliar as possibilidades de aplicação e promover aumento de vida útil dos equipamentos.

Estudos de ligas de cobalto são cada vez mais relevantes e abrem caminho para novas discussões, principalmente no que se refere ao seu comportamento tribológico.

A Inconel 625 é uma liga do grupo níquel – ferro consistindo, basicamente, de uma matriz austenítica  $\gamma$  CFC (cúbica de face centrada), com fases intermetálicas e carbonetos que precipitam durante a solidificação e tratamentos térmicos. Esta liga tem inúmeras aplicações em uma ampla faixa de temperaturas. Para a maioria das aplicações ela é conformada mecanicamente em tarugos, chapas, tubos, forjados em geral e fundida. Uma das aplicações em estudos da liga Inconel 625 é na confecção de tubos para a indústria de petróleo e gás.

A melhoria dos processos dos tratamentos termoquímicos tende a contribuir ecológica e financeiramente para a indústria. A nitretação, cementação e carbonitretação a plasma em baixa temperatura ( $< 400^{\circ}\text{C}$ ), podem aumentar a dureza da superfície e as propriedades tribológicas nos aços inoxidáveis austeníticos devido a formação de uma camada supersaturada em nitrogênio (N) ou em carbono (C), conhecida como austenita expandida ou fase S.

Técnicas de análise utilizadas para o estudo dos materiais: microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X, dureza (microdureza e nanodureza) e ensaio de microabrasão.

### **Atividades a serem realizadas por professor visitante**

- Ministrar disciplinas no Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PROPEMM), como: Tópicos Complementares I (Comportamento Mecânico dos Materiais) e Tópicos Complementares II (Ensaio dos Materiais).
- Coorientar 2 alunos de mestrado e 1 alunos de iniciação científica.
- Contribuir para o incremento da publicação científica de docentes, pesquisadores e discentes do PROPEMM, em revistas de elevada qualificação (A1 à A4) segundo os padrões Qualis com elevado fator de impacto e publicação de artigos em congresso internacional.

### **Ementa das disciplinas:**

#### Tópicos Complementares I (Comportamento Mecânico dos Materiais)

INTRODUÇÃO ELASTICIDADE E PLASTICIDADE; DEFORMAÇÃO PLÁSTICA; TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS; MECANISMOS DE ENDURECIMENTO; FRATURA; Aspectos Microestruturais da Fadiga; Aspectos Microestruturais da Fluência; Aspectos Experimentais.

### **Bibliografia:**

1. DIETER METALURGIA MECÂNICA 2. Bannantine , Julie A., Comer, Jess J., HandRook, James L., Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, 1990 by Prentice Hall, Inc (Mediateca EST MM.CMM 2539.0) 3. Branco, Carlos M., Mecânica dos Materiais, 3ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian (Mediateca EST; MM.CMM (M4805) ES TSM M4805; MM.CMM (M4808) ESTSM M4808; 4. MM.CMM (M4809) ESTSM M4809) Dowling, Norman E., Mechanical Behaviour of Materials, 2nd Edition, Prentice Hall (Mediateca EST MM.AERM M1962) 5.

Branco, Carlos M., Fernandes, A. A., Castro, Paulo M. S., Fadiga de Estruturas soldadas, Fundação Calouste Gulbenkian (Mediateca EST MM.CMM 1312.0 ESTSM M3075; MM.CMM 1312.1 ESTSM M3076) 6. Souza, S. A., Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos, Ed. Edgard Blucher. 1999.

### Tópicos Complementares II (Ensaio dos Materiais)

Fundamentos de ensaios mecânicos: tensões, deformações. Elasticidade e Plasticidade. Introdução aos END e ED. Técnicas de inspeção visual, ensaio com líquidos penetrantes, ensaio com partículas magnéticas, ensaio por correntes parasitas, ensaio por ultrassom, ensaio radiográfico e gamagrafia. Ensaios mecânicos destrutivos: ensaio de tração, ensaio de compressão, ensaios de dureza, ensaio de impacto, ensaio de dobramento, ensaio de torção, ensaio de fadiga, ensaio de fluência e ensaio de relaxação. Mecanismos elementares de propagação de trincas; aspectos fenomenológicos, modelos e abordagem numérica. Análise de desempenho e de falhas. Materiais e suas propriedades: tipos de propriedades; mapas de propriedades. Métodos de avaliação de propriedades mecânicas de materiais: "strain gauge" e ensaios mecânicos padronizados.

### **Bibliografia:**

1. ANDERSON, T. L. Fracture mechanics: fundamentals and applications. 3rd Edition. CRC Press, 2004. 2. BORESI, A. P.; SCHMIDT, R. J. Advanced mechanics of materials. 6th Edition. John Wiley & Sons, 2002 3. CHEN, W.F.; HAN, D.J. Plasticity for structural engineers. New York: SpringerVerlag, 1998.

### **Justificativa detalhada e circunstanciada da necessidade de contratação:**

1. Contribuir para o fortalecimento do Programa de Pós-Graduação Stricto sensu em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do IFES/Vitória;

2. Contribuir para o aprimoramento e a internacionalização do Programa de Pós-Graduação Stricto sensu na área de pesquisa e extensão;
4. Promover e expandir a cooperação e produção científica e tecnológica internacional do IFES/Vitória;
5. Melhoria de indicadores de evasão, de retenção e finalização dos alunos;
6. Melhoria de indicadores de publicação e avaliação do curso de pós-graduação (PROPEMM) perante a CAPES.

**Número de Professor Visitante a ser contratado:**

1 (um).

**Perfil do professor visitante a ser contratado:**

- Doutorado em Engenharia Metalúrgica ou Engenharia de Materiais ou Engenharia Mecânica (área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais) obtido, no mínimo, há cinco anos;
- Ser docente ou pesquisador de reconhecida competência na área de Ciência e Engenharia Materiais;
- Ter produção científica e técnica relevante na área de Ciência e Engenharia Materiais, preferencialmente nos últimos 5 anos.

**Curso em que o docente deverá atuar:**

Mestrado acadêmico em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PROPEMM);  
Área do conhecimento do CNPq: METALURGIA FÍSICA (3.03.04.00-8);  
Carga Horária: 40 h DE.

**Nomes dos membros que integrarão a Comissão de Seleção:**

Adonias Ribeiro Franco Júnior, Estefano Aparecido Vieira e ...

**Área de conhecimento a serem atendidas, de acordo com a Tabela de Áreas do Conhecimento do CNPq:**

- METALURGIA FÍSICA (3.03.04.00-8).

**Tema(s) para o(s) Plano(s) de Trabalho a ser(em) apresentado(s):**

- Tratamentos superficiais em metais.

**Período sugerido para realização da seleção:**

- Janeiro/2025.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] X. Wang, H. Wang, Converter practice in China with respect to steelmaking and ferroalloys, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. 128 (2019) 46–57. <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1539537>.
- [2] A. Hanna, H.J. Junger, T. Kollmann, A. Cepak, Slag splashing practices and basic oxygen furnace lining recommendations, in: *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings, 2013*: pp. 821–828.
- [3] P.C. Mahapatra, S. Majumdar, R. Shrinivas, T.K. De, S. Verma, P.K. Dewanjee, S.M. Mohanty, Understanding slag splashing technology in BOF, *SEASI Quarterly (South East Asia Iron and Steel Institute)*. 29 (2000) 54–60.
- [4] R.J. Fruehan, New steelmaking processes: Drivers, requirements and potential impact, *Ironmaking and Steelmaking*. 32 (2005) 3–8. <https://doi.org/10.1179/irs.2005.32.1.3>.
- [5] H.-M. Guo, J. Yang, Research of BOF protection technology by slag splashing, 2009. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.620-622.45>.
- [6] A. Ritt, Working smarter in the melt shop, *Iron Age New York, N.Y.* 11 (1995) 20–23.
- [7] S. Robertson, Two ways to add lining life: slag splashing and better brick, *Iron Age New York, N.Y.* 10 (1994) 42–44.
- [8] K.M. Goodson, N. Donaghy, R.O. Russell, Furnace refractory maintenance and slag splashing, *Iron and Steelmaker (I and SM)*. 22 (1995) 31–34.
- [9] B. Snyder, D.J. Lach, M.T. Skumanick, Equipment and gas supply options for BOF cost reduction technologies, *Iron and Steel Engineer*. 72 (1995) 9–16.
- [10] N. Goodman, Slag splashing of BOS converters, *Steel Times*. 224 (1996) 70–71.
- [11] C.J. Messina, Slag splashing in the BOF - Worldwide status, practices and results, *Iron and Steel Engineer*. 73 (1996) 17–19.
- [12] K.D. Peaslee, Physical modeling of slag splashing in the BOF, *Iron and Steel Engineer*. 73 (1996) 33–37.
- [13] H.-U. Schmidt, W. Holzhey, E. Kruschke, T. Daum, K. Müller, Slag splashing at Eko Stahl to reduce refractory costs, *Steel Times*. 226 (1998) 286–287.
- [14] D. Macauley, Engineering developments lead to greater economy, *Steel Times International*. 20 (1996) 12–14.
- [15] D. Macauley, Engineering developments lead to greater economy, *Steel Times International*. 20 (1996) 12–14.
- [16] C.-J. Liu, Y.-X. Zhu, M.-F. Jiang, Physical modelling of slag splashing in converter, *Ironmaking and Steelmaking*. 30 (2003) 36–42. <https://doi.org/10.1179/030192303225009489>.
- [17] V. Sinelnikov, M. Szucki, T. Merder, J. Pieprzyca, D. Kalisz, Physical and numerical modeling of the slag splashing process, *Materials*. 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14092289>.
- [18] G. Yang, B. Li, M. Sun, D. Qin, L. Zhong, Numerical Simulation of the Slag Splashing Process in A 120 Ton Top-Blown Converter, *Metals (Basel)*. 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/met13050940>.
- [19] P.M.G.C. Leão, E.F. Rodrigues, C.A. da Silva, I.A. da Silva, V. Seshadri, Influence of physical properties of slag and operational parameters on slag splashing process in an oxygen convertor, in: *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016, 2016*: pp. 1043–1051. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4\\_111](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_111).
- [20] K.C. Mills, Y. Su, A.B. Fox, Z. Li, R.P. Thackray, H.T. Tsai, A review of slag splashing, *ISIJ International*. 45 (2005) 619–633. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.619>.
- [21] L. Zhong, Y. Zhu, Adhesive behaviour of BOF slag to BOF lining refractory in slag splashing process, *Steel Res Int*. 77 (2006) 939–942. <https://doi.org/10.1002/srin.200606485>.
- [22] C.J. Messina, J.R. Paules, Worldwide status of BOF slag splashing practices and performance, in: *Steelmaking Conference Proceedings, 1996*: pp. 153–155.
- [23] W.E. Lee, R.E. Moore, Evolution of in situ refractories in the 20th century, *Journal of the American Ceramic Society*. 81 (1998) 1385–1410. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02497.x>.
- [24] Z. Wang, Q. Liu, L. You, S. Wei, L. Cao, Experimental study on slag splashing of an 80 t combined blown converter, *Ironmaking and Steelmaking*. 45 (2018) 379–385. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1274548>.
- [25] D.S. Kumar, G. Prasad, S.C. Vishwanath, P.K. Ghorui, D. Mazumdar, M. Ranjan, J.P.N. Lal, Converter life enhancement through optimisation of operating practices, *Ironmaking and Steelmaking*. 34 (2007) 521–

528. <https://doi.org/10.1179/174328107X203903>.
- [26] M.J. Luomala, T.M.J. Fabritius, E.O. Virtanen, T.P. Siivola, T.L.J. Fabritius, H. Tenkku, J.J. Härkki, Physical model study of selective slag splashing in the BOF, *ISIJ International*. 42 (2002) 1219–1224. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1219>.
- [27] L. Zhong, Y. Zhu, M. Jiang, Z. Qu, Y. Za, X. Bao, Cold modelling of slag splashing in LD furnace by oxygen lance with twisted nozzle tip, *Steel Res Int*. 76 (2005) 611–615. <https://doi.org/10.1002/srin.200506065>.
- [28] X. Zhou, M. Ersson, L. Zhong, P.G. Jönsson, Numerical and Physical Simulations of a Combined Top-Bottom-Side Blown Converter, *Steel Res Int*. 86 (2015) 1328–1338. <https://doi.org/10.1002/srin.201400376>.
- [29] K. Wünnenberg, J. Cappel, Cost-saving operation and optimization on metallurgical reactions in BOF practice, *Iron and Steel Technology*. 5 (2008) 66–73.
- [29] K. Wünnenberg, J. Cappel, Cost-saving operation and optimization on metallurgical reactions in BOF practice, *Iron and Steel Technology*. 5 (2008) 66–73.
- [30] V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, R.D. Kuzemko, Study of the Phase and Mineralogical Properties of Converter Slag During Splashing to Improve Lining Resistance, *Refractories and Industrial Ceramics*. 59 (2018) 403–409. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0244-y>.
- [31] I.A. Souza Santos, V.R. De Medeiros Santos, W. Dos Reis Lima, A.L. Da Silva, B.T. Maia, J.R. De Oliveira, Slag Splashing: Simulation and analysis of the slags conditions, *Journal of Materials Research and Technology*. 8 (2019) 6173–6176. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.011>.

# Área de Concentração A: Propriedades Físicas e Químicas dos Materiais

## Linha de pesquisa 1 - Propriedades Mecânicas dos Materiais

*Equivalente as antigas linhas:*

*1- Propriedades físicas dos metais*

*2- Materiais cerâmicos, poliméricos e conjugados*

*Uma das condições desta linha pesquisa será estabelecer os métodos para determinar as propriedades mecânicas e caracterizar novos materiais nas condições especificadas pelas normas. Esta linha de trabalho estará relacionada ao processamento dos materiais e os efeitos de elementos de liga nas propriedades mecânicas. Cabe ainda nesta linha de pesquisa o conhecimento das técnicas de microscopia eletrônica para se obter informações sistemáticas que contribuam para consolidar os aspectos experimentais envolvidos na caracterização e desenvolvimento de novos materiais.*

*Esta linha de pesquisa estudará os seguintes temas:*

*- Propriedades mecânicas dos materiais metálicos: Tem o objetivo de estudar a influência de diferentes parâmetros e da forma de processamento nas propriedades mecânicas e na microestrutura dos metais.*

*Prof. Dr. André Itman Filho*

*Prof. Dr. Armando Marques*

*Prof. Dr. Adonias Ribeiro Franco Júnior*

*Prof. Dr. Marcelo Lucas Pereira Machado*

*- Propriedades mecânicas dos Materiais cerâmicos, compósitos: Tem o objetivo de estudar a influência de diferentes parâmetros e da forma de processamento nas propriedades mecânicas e na microestrutura dos materiais cerâmicos, poliméricos e compósitos. Serão feitos estudos sobre o processamento destes materiais correlacionados à termodinâmica de formação, fundamentos de processo e outras variáveis que influenciam a fabricação e as propriedades destes materiais.*

*Profa. Dra. Viviana Possamai Della Sagrillo*

*Prof. Dr. Pedro Vitor Morbach Dixini*

*Prof. Dr. André Gustavo de Souza Galdino*

*-Propriedades mecânicas das Rochas Ornamentais: Tem por objetivo estudar por meio dos ensaios de caracterização de rochas ornamentais a influência de diversos parâmetros como propriedades mineralógicas, texturais e estruturais de rochas nas propriedades das Rochas Ornamentais Naturais e Sintéticas e nas chapas produzidas com estas rochas envolvendo a correlação entre parâmetros intrínsecos das rochas (mineralogia, estrutural e textura) com as etapas de*



beneficiamento primário (desdobramento) e secundário (acabamento superficial).

Profa. Dra. Viviana Possamai Della Sagrillo

Prof. Dr. André Gustavo de Souza Galdino

## **Linha de pesquisa 2 - Tratamentos dos Materiais e Tribologia**

*Equivalente as antigas linhas:*

*1- Engenharia de superfícies e tribologia*

*2- Tratamentos térmicos e termoquímicos*

*Esta linha de pesquisa tem o objetivo de estudar as transformações de fases que ocorrem em processos difusivos e não-difusivos; determinar experimentalmente os diagramas de fases e curvas de temperatura e tempo de transformação, otimizando os ciclos térmicos. Outro objetivo é estudar o comportamento superficial de componentes para aumento de desempenho em condições de solicitação extrema de atrito, corrosão, desgaste e oxidação.*

*Esta linha de pesquisa estuda os seguintes temas:*

*- Engenharia de Superfícies e Tribologia: Abordará experimentalmente, com o auxílio de ensaios e de técnicas de análise de superfícies, os processos de corrosão, deposição ou de modificação superficial assistidos por plasma, laser, feixe de íons ou de elétrons, estabelecendo correlações entre o processamento, a microestrutura e as propriedades físicas dos materiais modificados superficialmente ou dos conjuntos ímbe/substrato obtidos, estudo desta linha de pesquisa a análise do comportamento tribológico (aderência, atrito e desgaste) de recobrimentos duros ou de superfícies modificadas e de usinagem dos metais.*

*Professores responsáveis:*

*Prof. Dr. André Itman Filho*

*Prof. Dr. Armando Marques*

*Prof. Dr. Adonias Ribeiro Franco Júnior*

*- Tratamentos Térmicos e Termoquímicos: Tem o objetivo de estudar as transformações de fases que ocorrem em processos difusivos e não-difusivos; determinar experimentalmente os diagramas de fases e curvas de temperatura e tempo de transformação, otimizando os ciclos térmicos. Outro objetivo é estudar o comportamento superficial de componentes para aumento de desempenho em condições de solicitação extrema de atrito, corrosão, desgaste e oxidação. Procura-se manter uma forte interação com as instituições de pesquisa e as empresas do setor metalmeccânico.*

*Professores responsáveis:*

*Prof. Dr. André Itman Filho*

*Prof. Dr. Adonias Ribeiro Franco Júnior*

# Área de Concentração B: Tecnologia e Processos de Fabricação

## Linha de pesquisa 1 - Processos e Etapas de Fabricação de Materiais

*Equivalente as antigas linhas:*

- 1- Processos e etapas de fabricação de aço e ligas não ferrosas*
- 2- Simulação e modelagem de processos industriais*

*O objetivo desta linha de pesquisa é desenvolver processos para fabricação de aços e ligas não ferrosas para atender as propriedades físicas exigidas pela demanda de mercado. Os estudos são focados no controle da adição de elementos de ligas e da composição química na etapa de fusão, modificação do processo de refinamento, conformação mecânica por meio de forjamento e laminação e nos tratamentos termomecânicos dos materiais elaborados. Neste contexto, esta linha de pesquisa proporciona diferentes metodologias no desenvolvimento das ligas estendendo-se desde o refino primário até a produção de produtos semiacabados com propriedades físicas adequadas ao atendimento das normas técnicas, considerando os princípios da tecnologia sustentável e as relações do ambiente com a sociedade.*

*Esta linha de pesquisa envolve os seguintes temas:*

***Simulação e Modelagem de Processos Industriais:*** Tem a finalidade de desenvolver modelos matemáticos e empíricos e realizar simulações de processos industriais como a laminação de aços e ligas, processos de redução e refino de metais, **fabricação de rochas ornamentais sintéticas e outras matérias com rochas ornamentais naturais**, processos envolvendo termodinâmica e balanços térmicos, além de elaborar modelos matemáticos para análises da microestrutura e propriedades mecânicas dos materiais.

*Professores responsáveis:*

*Prof. Dr. Marcelo Lucas Pereira Machado*

*Prof. Dr. José Roberto de Oliveira*

*Prof. Dr. Felipe Fardin Grillo*

*Prof. Dr. Simão Vervloet*

*Ramos*

*- Desenvolvimento de Ligas Metálicas: Estudar as diferentes etapas de fabricação de aço e de ligas não ferrosas. Como exemplo desta linha tem-se o pré-tratamento de gusa, refinamento primário e refinamento secundário, assim como os diferentes processos: pneumático, elétrico e novos processos como o HISMELT. Serão estudados também as etapas*

*de dessiliciação, dessulfuração, desfosforação, desgaseificação e eliminação de inclusões de ferro-gusa e aço. Tem por objetivo também estudar a fabricação de ligas não ferrosas procurando desenvolver novos processos e otimizar os já existentes, além de utilizar matérias primas alternativas melhorando a ciência da remoção de impurezas, diminuição da geração de escória e obtenção de propriedades mecânicas melhoradas associadas à redução dos custos de produção. Será também estudado a utilização de matérias-primas alternativas em substituição às convencionais.*

*Professores responsáveis:*

*Prof. Dr. José Roberto de Oliveira*

*Prof. Dr. Ramiro da Conceição Nascimento*

*Prof. Dr. Estéfano Aparecido Vieira*

### - Simulação, Otimização e Modelagem de Processos de Extração e Beneficiamento de Rochas Ornamentais e Fabricação de Rochas Ornamentais Sintéticas .

Tem a finalidade de desenvolver e avaliar modelos matemáticos e empíricos e realizar simulações de processos de Extração e Beneficiamento de Rochas Ornamentais e fabricação de Rochas Ornamentais Sintéticas, utilizando-se de softwares e análise de experimentos. Analisar e avaliar os parâmetros fundamentais que influenciam a produtividade dos métodos e processo de lavra e beneficiamento para embasar a tomada de decisão durante o processo de planejamento e execução do empreendimento mineral, buscando assim a viabilidade econômica dos cenários mais relevantes como melhor alternativa de investimentos. Desenvolver tecnologias em Rochas Ornamentais, otimização da lavra, inovação em processos, e equipamentos, insumos e ferramentas para o beneficiamento,

Profa. Dra. Viviana Possamai Della Sagrillo

Prof. Dr. André Gustavo de Souza Galdino

## **Linha de pesquisa 2 - Redução e Aglomeração de Matérias-primas**

*Equivalente as antigas linhas:*

*1- Resíduos Sólidos Industriais*

*2- Redução e Aglomeração de Matérias-primas*

*Esta linha de pesquisa tem como objetivo otimizar e desenvolver as técnicas de produção de ferro primário associadas aos processos de pelotização, sinterização e coqueria. Em geral são desenvolvidos projetos de pesquisa com temas relacionados à melhoria do rendimento operacional de um alto forno de uma usina integrada. Neste contexto, a etapa da pelotização é um importante fator a ser aperfeiçoado. São realizados procedimentos para confecção de pelotas com diversas misturas de pós de diferentes granulometrias e morfologias, acompanhados de testes mecânicos e caracterização estrutural para avaliar a qualidade das mesmas. Esta linha de pesquisa também contempla técnicas especiais de obtenção de metais por meio da redução dos óxidos utilizando plasma a frio de hidrogênio. Para desenvolvimento destas pesquisas são utilizadas câmaras para obtenção de plasma com controle da temperatura e tempo e posteriormente métodos experimentais para determinação da composição*

*química e estrutura cristalina dos produtos obtidos. É importante citar a parceria das empresas nestes projetos de pesquisa tendo como foco a solução de problemas do setor industrial e o desenvolvimento de novos processos para obtenção de materiais de maneira sustentável, para aperfeiçoar as relações do ambiente e sociedade.*

*Esta linha de pesquisa envolve os seguintes temas:*

*- Redução e Aglomeração de Matérias-primas: Está relacionada ao estudo dos diferentes processos de redução e aglomeração de matérias-primas, tais como minério de ferro, resíduos siderúrgicos e de rochas ornamentais, visando sua utilização no processo de fabricação de ferro e aço.*

*Professores responsáveis:*

*Prof. Dr. Estéfano Aparecido Vieira*

*Prof. Dr. José Roberto de Oliveira*

*Prof. Dr. Pedro Vitor Morbach Dixini*

*Prof. Dr. Ramiro da Conceição Nascimento*

*Prof. Dr. Simão Vervloet Ramos*

*- Resíduos Sólidos Industriais: Visa a utilização de resíduos industriais, como os resíduos siderúrgicos e os gerados no beneficiamento de rochas ornamentais, entre outros nas seguintes aplicações: Fabricação de aço; Fabricação de ligas não ferrosas; Fabricação de ferro-gusa; Fabricação de Materiais Cerâmicos e compósitos.*

*Professores responsáveis:*

*Prof. Dr. José Roberto de Oliveira*

*Prof. Dr. Ramiro da Conceição Nascimento*

*Prof. Dr. Estéfano Aparecido Vieira*

*Profa. Dra. Viviana Possamai Della Sagrillo*

*Prof. Dr. Pedro Vitor Morbach Dixini*

*Prof. Dr. André Gustavo de Souza Galdino*