



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

MAYARA DE OLIVEIRA BANDEIRA

**AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE SEDIMENTOS COESIVOS
COM DIFERENTES TEORES DE AREIA**

VITÓRIA

2022

MAYARA DE OLIVEIRA BANDEIRA

**AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE SEDIMENTOS COESIVOS
COM DIFERENTES TEORES DE AREIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como partes dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Valéria da Silva Quaresma

Coorientador: Dr.^a Caroline Fiório Grilo

VITÓRIA

2022

MAYARA DE OLIVEIRA BANDEIRA

**AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE SEDIMENTOS COESIVOS
COM DIFERENTES TEORES DE AREIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dra. Valéria da Silva Quaresma – Orientadora
Universidade Federal do Espírito Santo / UFES

Prof. Dra. Kyssyanne Samihra Santos Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo / UFES

Prof. Dr. José Antônio Baptista Neto
Universidade Federal Fluminense/UFF

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer aos meus pais Pedro e Geralda por todo apoio e cuidado, vocês são a razão disso tudo.

Agradeço à minha orientadora Valéria Quaresma por todo o conhecimento ensinado e toda a ajuda quando precisei. Por ter sido paciente quando tive dificuldades, por todas as dúvidas tiradas e pelas críticas construtivas. Agradeço também a minha coorientadora Caroline Grilo por todo apoio, ajuda e auxílio para desenvolver essa dissertação. As orientações e direcionamentos de vocês foram essenciais para esse estudo.

Agradeço a Kyssyanne por também ter ajudado a dar vida ao tema e as ideias para essa dissertação, por todas as dúvidas tiradas e além disso pela disponibilidade em participar da minha comissão avaliadora. Agradeço também a Prof. José Antônio pela disponibilidade em participar da comissão avaliadora.

Agradeço a Daniele Peron por auxiliar na coleta das amostras e a empresa Aratu pelo desenvolvimento do equipamento utilizado nessa pesquisa.

Agradeço as meninas do laboratório de sedimentologia (Livia, Anita, Karen, Flávia, Lorena) por todo apoio e pelos momentos de descontração.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia.

RESUMO

O estudo tem como foco aumentar a capacidade preditiva de resistência à erosão e transporte de sedimentos, determinando experimentalmente a relação entre teor de areia/lama, taxas de erosão, tensão crítica de cisalhamento e decantação do sedimento. Para tal, a erodibilidade de sedimentos coesivos com diferentes teores de areia foi estudada com base em experimentos em laboratório utilizando uma Câmara para Teste de Erodibilidade. Amostras sedimentares com diferentes porcentagens de areia fina (0 a 90%) foram testadas: (1) Argila Industrial (AR) - amostra controle; (2) Sedimento coletado na Plataforma Continental do Espírito Santo (PC); (3) Fração lamosa (granulometria menor que 63 μ m) da amostra PC (PCL). Os experimentos de erosão foram iniciados após testes de consolidação, que foram previamente realizados para determinar diferentes valores de densidade do fundo para cada amostra em relação ao tempo de consolidação. Dessa forma, todos os testes de erodibilidade puderam ser realizados com densidades similares. Os resultados apontaram que a amostra AR apresentou características de um fundo mais erodível com menor tensão crítica de cisalhamento e maiores taxas de erosão. A amostra PCL apresentou a menor erodibilidade, com os maiores valores de tensão crítica de cisalhamento e menores taxas de erosão. A amostra PC apresentou valores entre os medidos para as outras amostras. No geral, as taxas de erosão diminuíram ao adicionar 15% de areia nas amostras, corroborando com os maiores valores de tensão crítica observada nos experimentos com adição de areia, indicando que taxa de erosão diminuiu com o aumento da resistência ao cisalhamento. O mesmo não ocorreu para as amostras com o conteúdo de areia de 45 a 60%, onde ocorreu uma diminuição nas taxas de erosão. Dessa forma, pôde-se observar que o aumento da areia na matriz do sedimento induz a uma erosão antecipada, mas à uma taxa mais baixa. As taxas de erosão foram reduzidas em todas as amostras para porcentagens de areia maiores que 30%. Foi observado que a presença da fração areia na suspensão inicial tem um grande impacto nos processos de formação do leito. É comum que a lama e a areia se separem em condições típicas de deposição devido à suas diferentes velocidades de decantação, que podem criar camadas com diferentes estruturas e resistências à erosão. Os resultados aqui apresentados podem ser úteis para

fins de engenharia e para o desenvolvimento de modelos mais precisos de transporte de sedimento misto.

Palavras-chave: Erodibilidade, Sedimentos Coesivos, Tensão crítica de cisalhamento, Taxas de Erosão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo da amostra de sedimento superficial coletada na Plataforma Continental do Espírito Santo.	15
Figura 2: Mapa de localização do ponto de coleta da amostra PC.....	15
Figura 3: Testes de consolidação realizados no Laboratório de sedimentologia.....	18
Figura 4: Representação esquemática da Câmara para Teste de Erodibilidade – CATER equipada com Sensor Óptico de Retrodispersão (OBS) posicionado a 10 cm de profundidade. Fonte: Empresa Aratu equipamentos de pesquisa.	20
Figura 5: Curva de calibração utilizando grãos de areia de quartzo.	22
Figura 6: Calibração do OBS das amostras AR, PC e PCL. Demais calibrações realizadas estão no Apêndice B.....	23
Figura 7: Distribuição do tamanho de partículas (< 63µm) da amostra AR de acordo com a classificação de Wentworth (1922).	25
Figura 8: Percentuais mineralógicos da amostra AR.....	25
Figura 9: A) Distribuição do tamanho de partículas da fração arenosa (>63 µm). B) Distribuição do tamanho de partículas (< 63µm) de acordo com a classificação de Wentworth (1922).	26
Figura 10: Percentuais mineralógicos da amostra PCL.....	27
Figura 11: Densidade úmida versus tempos de consolidação das amostras PC, AR e PCL.	28
Figura 12: Densidade úmida versus tempos de consolidação das amostras AR com porcentagens de 15 a 90% de areia.	29
Figura 13: Densidade úmida versus tempos de consolidação das amostras PC com porcentagens de 30 a 90% de areia.	30
Figura 14: Densidade úmida versus tempos de consolidação das amostras PCL com porcentagens de 30 a 90% de areia.	31
Figura 15: Experimentos de erodibilidade da amostra AR. A) Série temporal de medições; B) Taxas líquidas de erosão versus Tensão de cisalhamento do fundo; C) Taxas de erosão em relação ao tempo; D) Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo.	32
Figura 16: Experimentos de erodibilidade amostra PC. A) Série temporal de medições. B) Taxa líquida de erosão versus tensão de cisalhamento do fundo; C) Taxa de erosão em relação ao tempo. D) Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo.....	34
Figura 17: Experimentos de erodibilidade amostra PCL. A) Série temporal de medições. B) Taxa líquida de erosão versus tensão de cisalhamento do fundo; C) Taxa de erosão em relação ao tempo; D) Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo.....	35
Figura 18: Série temporal de medições dos testes de erodibilidade utilizando a amostra AR com 15 a 90% de areia.	37
Figura 19: Taxas de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo para as amostras AR.	39
Figura 20:(A) Taxa líquida de erosão versus tensão de cisalhamento de fundo dos testes de erodibilidade; (B)Taxa de erosão versus tempo decorrido do experimento utilizando a amostra AR com porcentagens de 15 a 30% de areia.	41

Figura 21: Série temporal de medições dos testes de erodibilidade utilizando a amostra PC com porcentagens de 30 a 90% de areia.	42
Figura 22: Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo das amostras PC com 30 a 90% areia.	44
Figura 23: (A)Taxa Líquida de erosão versus tensão de cisalhamento de fundo dos testes de erodibilidade. (B) Taxa de erosão versus tempo decorrido do experimento utilizando a amostra PC com porcentagens de 30 a 90% de areia.	45
Figura 24: Série temporal de medições dos testes de erodibilidade utilizando a amostra PCL com porcentagens de 15 a 90% de areia.	47
Figura 25: Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo das amostras PCL com 15 a 90% de areia.	49
Figura 26: (A) Taxa Líquida de erosão versus tensão de cisalhamento de fundo dos testes de erodibilidade; (B)Taxa de erosão versus tempo decorrido do experimento utilizando a amostra PCL com porcentagens de 15 a 30% de areia.	50
Figura 27: Tensão de cisalhamento crítica plotada contra o conteúdo de areia das amostras AR, PC e PCL.	52
Figura 28: Gráfico da taxa média de erosão em relação à porcentagem de areia para amostras AR, PC e PCL.	53
Figura 29: Curvas de concentração de sedimentos em suspensão dos experimentos da amostra AR com diferentes percentuais de areia em sua composição. Os gráficos são apresentados para 30 min de experimento. O gráfico completo das curvas de decantação está apresentado no Apêndice B.	55
Figura 30: Curvas de concentração de sedimentos em suspensão dos experimentos da amostra PC com diferentes percentuais de areia em sua composição. Os gráficos são apresentados para 30 min de experimento. O gráfico completo das curvas de decantação está apresentado no Apêndice B.	56
Figura 31: Curvas de concentração de sedimentos em suspensão dos experimentos da amostra PCL com diferentes percentuais de areia em sua composição. Os gráficos são apresentados para 30 min de experimento. O gráfico completo das curvas de decantação está apresentado no Apêndice B.	57
Figura 32: Exemplo de uma amostra testada nesse estudo. Observe a estrutura em camadas segregadas de areia e lama. A seta indica o contanto entre as duas camadas.	61
Figura 33: Taxas de erosão versus excesso de tensão de cisalhamento no fundo para a amostra PC90, evidenciando as duas linhas de tendência durante as fases de erosão.	63

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	18
Equação 2	18
Equação 3	21
Equação 4	22
Equação 5	24
Equação 6	24

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. METODOLOGIA	14
2.1 Caracterização das amostras	14
2.2 Análise Granulométrica e de Constituintes	16
2.4 Câmara para Teste de Erodibilidade (CATER)	19
2.4.1 Calibração do CATER.....	20
2.4.2 Calibração do Sensor Óptico de Retrodispersão (OBS).....	22
2.5 Testes de Erodibilidade	23
3. RESULTADOS	25
3.1 Análise granulométrica e constituintes	25
3.2 Testes de Consolidação	27
3.3 Testes de erodibilidade	31
3.4 Testes de erodibilidade das amostras com adição de areia	36
3.5 Curvas de Decantação dos sedimentos	53
4. DISCUSSÃO	58
4.1 Processo erosivo na plataforma continental adjacente a foz do Rio Doce .	64
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A: AMOSTRAS UTILIZADAS PARA REALIZAR OS EXPERIMENTOS	77
APÊNDICE B: CALIBRAÇÕES DO OBS DAS AMOSTRAS COM DIFERENTES PORCENTAGENS DE AREIA.	79
APÊNDICE C: CURVAS DE DECANTAÇÃO	81

1. INTRODUÇÃO

Depósitos de sedimentos coesivos são onipresentes em sistemas aquáticos ao redor do mundo em locais como estuários, enseadas e algumas áreas da plataforma continental e mar profundo onde se formam ou se depositam. Comumente chamados de “lama”, os sedimentos coesivos consistem em uma mistura de argila, silte, matéria orgânica, areia fina, água e alguns gases (Hillel,1982; Winterwerp & Kesteren, 2004; Van Rijn, 2020). São partículas de pequenas dimensões, compostas principalmente por silte fino e argila que apresentam uma área específica suficientemente grande para que o efeito das forças físico-químicas entre elas sejam tão importantes quanto o efeito da gravidade (Mehta e Partheniades, 1982; Van Rijn, 1993; Soulsby, 1997; Whitehouse et al.,2000; Righetti e Lucarelli, 2007; Dufois e Hir,2015), fazendo com que as forças interpartículas desempenhem um papel dominante no comportamento e propriedade erosional do sedimento (Mehta et al.,1989; Liu et al., 2018).

Leitos formados por sedimentos coesivos possuem importantes funções ecológicas, como habitats para diversas assembleias bentônicas, ciclagem biogeoquímica e reservas de carbono (Grabowski et al., 2011). No entanto, ao longo dos anos muitas práticas intensivas de uso do solo e poluição criaram estoques de contaminantes ligados a esses sedimentos, como metais, bactérias patogênicas e pesticidas. Construções de barragens, dragagens e canalizações também alteraram a quantidade e qualidade dos sedimentos nos sistemas aquáticos de uma forma geral. Dessa forma, o conhecimento do comportamento, bem como o desenvolvimento de modelos mais precisos de transporte de sedimento desse tipo de depósito é essencial para avaliação dos impactos da interferência humana (Torfs et al., 2000; Mostafa et al, 2008; Droppo et al. 2009; Yanga et al., 2019; Nguyen et al., 2019).

Neste contexto a previsão dos padrões de transporte de sedimentos coesivos apresenta importância econômica, ambiental e social significativa, podendo prevenir e avaliar problemas relacionados a: assoreamento de canais de navegação (Perkey et al., 2020), riscos geológicos costeiros e marinhos, perda de habitat e saúde e estrutura da comunidade bentônica (Cranford e G. Jr , 1992; Muschenheim e Milligan, 1996; Flemming e Delafontaine , 2000), redução da

qualidade da água (Schallenberg e Burns , 2004; Pratt et al., 2014), entre outros. Além disso, medições das taxas de sedimentação e/ou erosão são cruciais para avaliar a evolução morfodinâmica (Walsh e Nittrouer, 1994), bem como as mudanças associadas à composição e estrutura do leito (Torfs et al., 1996). No entanto, a previsão do transporte e destino de sedimentos coesivos, depende da compreensão física e da interação entre alguns processos como floculação, sedimentação, consolidação e erosão (Grasso et al., 2015; Cuthbertson et al., 2016). As partículas de argila têm o potencial de se agregarem devido à predominância das forças de van der Waals (Hillier,1995; Lick et al., 2004; Righetti e Lucarelli, 2007; Ternat et al., 2008; Hoath, 2016), essa agregação é chamada de floculação. A floculação é gerada pelas colisões entre as partículas devido ao movimento Browniano, das tensões de cisalhamento, e da sedimentação diferencial das partículas (Dyer, 1989; Burban et al., 1990; McAnally e Mehta, 2000; Droppo et al.,2009). As partículas pequenas colidem e aderem para formar partículas maiores (flocos), aumentando assim, a sua velocidade de decantação. Esse processo, de uma forma geral, tem seu incremento com o aumento da concentração do material particulado em suspensão (MPS), até uma concentração máxima de 2-10 g/L (Belarmont et al., 1993). A partir dessa concentração de MPS inicia-se o processo inverso, de quebra dos flocos, devido ao excesso de impactos, tornando os flocos menores. Assim sendo, o tamanho dos flocos formados pela colisão é o resultado de processos simultâneos de agregação e quebra, dependendo da concentração de MPS (Dyer, 1986; Mehta, 1989).

A partir do processo deposicional inicia-se o processo de formação do depósito, envolvendo processos de decantação impedida e de consolidação do leito. Durante a consolidação, os agregados depositados tendem a formar uma nova estrutura do leito, uma vez que na decantação impedida, o peso da suspensão de alta concentração é balanceado pelo escoamento ascendente de água dos poros dos sedimentos comprimidos (Mehta, 1989; Mehta e Dyer, 1990; Sills, 1994). Portanto, em leitos consolidados, o conteúdo de água no sedimento diminui exponencialmente com a profundidade, seguido por um aumento na resistência ao cisalhamento (Parchure e Mehta, 1985; Sanford e Maa,2001), já

que a expulsão da água favorece o contato entre as partículas e assim, o aumento da coesão entre as mesmas.

A erosão do leito é comumente descrita com base em dois parâmetros a taxa de erosão e a erosão crítica. A taxa de erosão está associada ao excesso de tensão de cisalhamento em função do tempo e da profundidade erodida. Pode ainda ser classificada, no caso dos leitos coesivos, como variando no tempo - “tipo I” ou constante com o tempo - “tipo II” (Amos, 1992; Sanford, 2008; Harris et al., 2016). A erosão do leito varia tanto com a magnitude da tensão de cisalhamento quanto com as características do depósito. Enquanto a tensão de cisalhamento é o principal parâmetro induzido pelo fluxo que caracteriza a força erosiva, a força de resistência corresponde a inúmeros fatores (Xu, 2019; Zhang et al., 2017; Sanford, 2008) incluindo composição do sedimento, porosidade e tamanho dos grãos (Roberts et al., 1998; Droppo, 2001; Lick et al., 2004; Jacobs, 2011; Van Rijn 2020; Perkey et al., 2020; Perera et al., 2020), influências biológicas (Andersen, 2001; Quaresma et al., 2004; Waqas et al., 2020), temperatura (Zreik et al., 1998), salinidade (Parchure e Mehta, 1985), pH (Ravisangar et al., 2005) e mineralogia (Crooks e Pye, 2000; Gerbersdorf et al., 2005; Gerbersdorf et al., 2007; Adesina et al., 2022).

Embora seja conveniente descrever o sedimento por um tamanho médio, a maioria dos sedimentos coesivos naturais é composta por uma variedade de tamanhos de partículas, e as proporções relativas dessas partículas também afetam substancialmente a erosão e deposição do sedimento. Várias pesquisas foram conduzidas sobre o comportamento de erosão de misturas de areia e lama nas últimas décadas (Mitchner e Torfs 1996; Le Hir et al., 2008; Jacobs et al., 2011; Carniello et al., 2012; Mehta e Letter, 2013; Van Rijn, 2020; Perera et al., 2020). Trabalhos anteriores indicaram que a resistência à erosão de um fundo se eleva com o aumento do teor de argila (Amos et al., 1995; Grabowsk et al., 2011; Perkey et al., 2020). O aumento do limiar de erosão é causado por uma combinação de alisamento hidrodinâmico, adesão argila/areia e coesão da argila (Torfs et al. 2000; Lick et al., 2004; Barry et al. 2006; Chen et al., 2021).

Os processos de erosão e transporte desses sedimentos heterogêneos são mais complexos do que a areia pura, pois variam com fatores como teor de lama, eficiência de empacotamento de partículas e tipo de argila (Mehta et al., 1989;

Mitchner e Torfs 1996; Gailani et al., 2001; Barry et al., 2006; Dickhudt et al., 2011; Jacobs et al., 2011; Chen et al., 2021; Perkey et al., 2020).

Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa é realizar experimentos de erosão, em um ambiente controlado, utilizando uma câmara para teste de erodibilidade com amostras com diferentes teores de areia e lama, a fim de avaliar a influência da diferença da granulometria do sedimento sobre a resposta à resistência à erosão. Para tal, foram utilizadas amostras de sedimentos *in situ* coletadas em um trecho norte da Plataforma Continental do Espírito Santo, adjacente à foz do Rio Doce e sedimentos artificiais, como a argila industrial. O estudo tem como foco aumentar a capacidade preditiva de resistência à erosão e transporte de sedimentos, determinando experimentalmente a relação entre teor de areia/lama, taxas de erosão, tensão crítica de cisalhamento e decantação do sedimento.

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterização das amostras

Três tipos de amostras sedimentares foram utilizados para a realização dos experimentos:

1) Argila industrial (AR) para modelagem artística, utilizada como amostra controle.

2) Sedimento coletado na Plataforma Continental do Espírito Santo (PC) (Fig. 1), localizado na isóbata de 20 m a sul da desembocadura do Rio Doce na costa sudeste brasileira (Fig. 2). Esse ponto foi escolhido por ser composto por fácies lamosas que são governadas pelo aporte sedimentar do Rio Doce, tendo maior teor de lama com maiores teores de argila (Quaresma et al., 2015). Foram coletados sedimentos com auxílio de um amostrador Van Veen dos primeiros 5 cm do amostrador até completar cerca de 2 kg de sedimento. Em laboratório continuaram refrigeradas e mantidas no escuro, para evitar atividades biológicas que pudesse interferir na quantidade de matéria orgânica até o momento das análises.



Figura 1: Exemplo da amostra de sedimento superficial coletada na Plataforma Continental do Espírito Santo.

3) Fração sedimentar $<63\mu\text{m}$ do sedimento coletado na Plataforma Continental (PCL). Essa amostra foi adquirida a partir do peneiramento via úmida (através da malha com abertura de $63\ \mu\text{m}$) da amostra PC, para remoção da fração de areia e, após, seca em liofilizador para facilitar a desagregação.

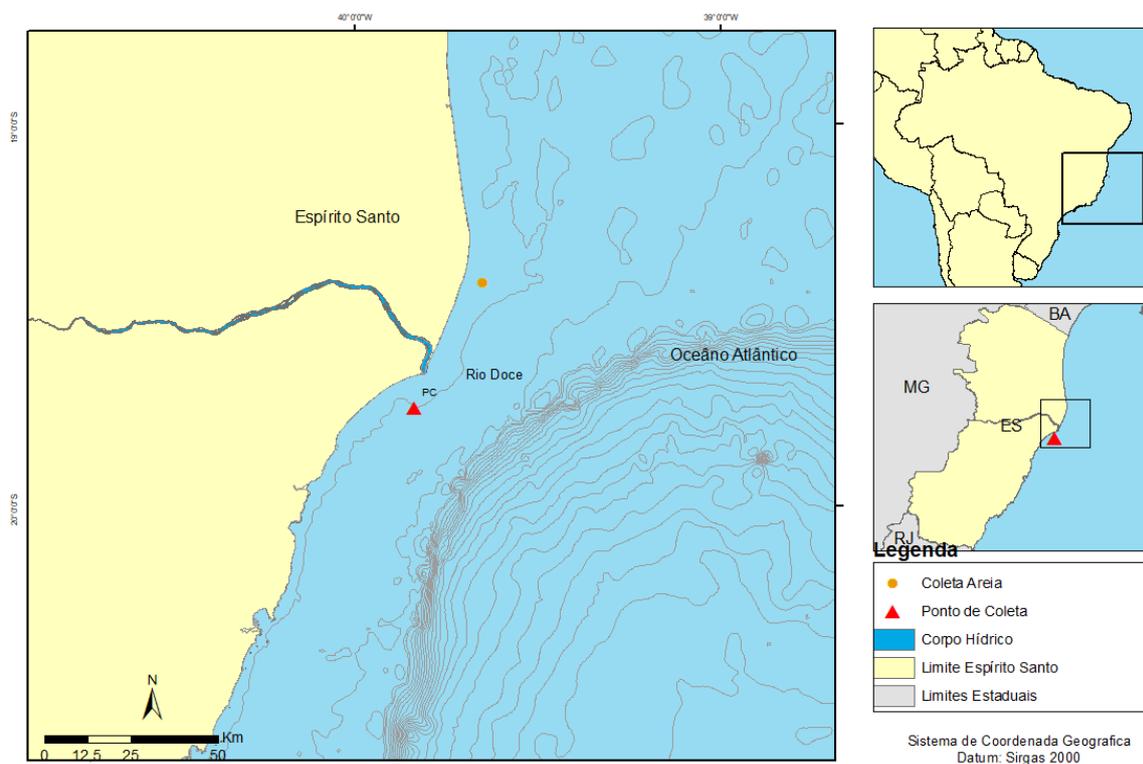


Figura 2: Mapa de localização do ponto de coleta da amostra PC.

Afim de estudar o efeito da areia nas propriedades erosivas dos sedimentos coesivos, foi adicionada areia, na faixa granulométrica fina, em teores de: 15, 30, 45, 60 e 90% nas amostras AR, PC e PCL. O sedimento arenoso utilizado também foi coletado na Plataforma adjacente à desembocadura do Rio Doce com auxílio de um amostrador Van Veen em um local com baixo teor de lama (Fig. 2). Além disso, a fração areia apresentou mineralogia uniforme, composta quase que exclusivamente de quartzo. Em laboratório, os sedimentos foram lavados para remoção do sal e da lama, em seguida foram secos em estufa (40°C). Após, foram peneirados com auxílio de um agitador mecânico utilizando-se peneiras com abertura da malha de 250 μm e 177 μm , para separação da fração arenosa a ser utilizada nos experimentos.

Análise Granulométrica e de Constituintes

Após a coleta da amostra PC, foi separada uma alíquota de 200 g para a sua caracterização, que englobou a distribuição granulométrica e os teores de carbonato de cálcio, matéria orgânica e mineralogia. Em laboratório a amostra foi lavada até a completa remoção de sal e seca em estufa à 40°C para aquisição do peso seco.

Foram realizadas a separação das frações finas e grossas através do método de separação via úmida utilizando peneira com abertura da malha de 63 μm . Para as frações de sedimentos <63 μm foi realizado a queima de matéria orgânica utilizando peróxido de hidrogênio 35%. Posteriormente foram analisadas usando o granulômetro a laser Malvern Mastersizer 2000. A determinação da granulometria da fração arenosa (> 63 μm) foi realizada através do método de peneiramento via seco com peneiras intercaladas de malhas com abertura em intervalos de 0,5 phi. A distribuição do tamanho das partículas foi classificada de acordo com Wentworth (1922). O teor de carbonato de cálcio foi determinado a partir da queima com ácido clorídrico (10%), em ambas frações da amostra até remoção total do carbonato do sedimento. Posteriormente secou-se a amostra na estufa a 40°C por 48 horas.

O teor de matéria orgânica total das amostras AR, PC e PCL foram realizados pelo método de combustão em mufla à 450°C por 4h (Mook e Hoskin,

1982). O resfriamento foi feito no dessecador por 2 horas. Após a queima e resfriamento, os valores de carbonato de cálcio e matéria orgânica foram determinados pela diferença entre o peso seco antes e após a queima.

A determinação da mineralogia foi realizada nas amostras AR e PCL seguindo metodologia descrita por Orlando et al. (2020), através do método de Difractometria de Raios-X convencional (DRX), utilizando um difratômetro de Raios-X. São considerados minerais essenciais aqueles que são superiores a 10%. Os minerais que apresentam teores < 1% são considerados traço. O limite de detecção é relacionado ao sinal/ruído das amostras quando lidas pelo difratômetro. Dessa forma, o limite de detecção de medidas mais simples é de 2,5% e nas mais apuradas é de 0,5%.

A amostragem para análise de densidade da amostra PC foi realizada de forma a coletar apenas a camada superficial de sedimento do pacote sedimentar amostrado e acondicionado em pote de 5 mL previamente pesado. Em laboratório o pote contendo a amostra foi pesado para obtenção do peso úmido e, então, foi levado à estufa à 40°C por 48h ou até que a amostra estivesse completamente seca. Após, seca foi novamente pesada. Para a determinação da densidade do sedimento superficial de fundo foi utilizado o método descrito por Amos e Sutherland (1994), onde a densidade é igual a massa úmida pelo seu volume.

2.2 Testes de Consolidação

A primeira etapa do experimento consiste em determinar diferentes valores de densidade para cada amostra em relação ao tempo de consolidação. Como o valor da densidade da amostra PC era conhecida, foram feitos testes de consolidação para determinar quantas horas de decantação eram necessários para que o pacote sedimentar de cada uma das amostras a serem analisadas atingisse uma densidade próxima à densidade da amostra PC do momento da coleta em campo ($\rho \approx 1218 \text{ kg m}^{-3}$). Dessa forma, todos os testes de erodibilidade puderam ser realizados com densidades similares. Para isso todas as amostras foram submetidas a testes de consolidação seguindo a metodologia descrita por Quaresma et al. (2004).

As amostras foram colocadas em provetas graduadas (Fig. 3), completadas por água do mar padrão. O preparo da água do mar padrão foi realizado com a adição de Cloreto de Sódio (35 g/L) em água destilada. Durante todo o experimento as amostras foram mantidas no escuro e com a temperatura do laboratório controlada. Mediu-se, então, a altura do sedimento em cada tempo de consolidação (2, 6, 10, 24 e 48 h), para calcular o volume do sedimento correspondente a cada tempo medido (Quaresma et al., 2004). Foram realizadas réplicas de cada amostra.

Para determinação da densidade do fundo, efetuou-se os seguintes cálculos:

1. A equação 1 mostra a forma do cálculo da massa total da amostra:

$$m_t = \rho_s V_s + \rho_w V_w \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{Onde, } \rho_s = 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ e } \rho_w = 1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_w = V_t - V_s;$$

$$V_t = \text{Volume da proveta};$$

- 2 – A equação 2 mostra a forma do cálculo da densidade do fundo:

$$\rho_b = \frac{m_t}{V_t} \quad \text{Equação 2}$$



Figura 3: Testes de consolidação realizados no Laboratório de sedimentologia.

2.3 Câmara para Teste de Erodibilidade (CATER)

O sistema EROMES, o qual se baseia o equipamento utilizado para realizar esse estudo, foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa GKSS (Alemanha) para investigar a erodibilidade de sedimentos coesivos naturais em laboratório. O princípio do EROMES se baseia em fluxo turbulento originado pelo movimento da hélice no interior do tubo, no qual, induz a erosão ou ressuspensão do leito. O movimento de redemoinhos turbulentos individuais erode o sedimento e os mantém em suspensão (Schünemann e Kuhl, 1991). Um sistema similar foi projetado e desenvolvido pela empresa Aratu (Brasil), para a execução desse trabalho, aqui chamada de CATER – Câmara para Teste de Erodibilidade.

A câmara para Teste de Erodibilidade (Fig. 4) consiste em uma estrutura polimétrica cilíndrica, com design projetado para atuar na determinação de erodibilidade e velocidade de decantação de sedimento em laboratório e *in situ*, onde a turbulência é induzida por uma hélice girando a velocidades programáveis. Além disso, esse equipamento possui uma gaiola metálica dentro do tubo para gerar o regime turbulento e evitar a circulação secundária. A hélice é acionada por um motor controlado por um painel de controle eletrônico, possibilitando determinar a velocidade das hélices de acordo com o objeto de estudo e metodologia aplicada.

Para medir a turbidez foi acoplado ao sistema um sensor óptico de retrodispersão (modelo OBS 3+, Campbell Scientific, Inc., USA), posicionado a 10 cm do fundo na parte externa do CATER, conectados a um *datalogger* (modelo CR 200 series, Campbell Scientific, Inc., USA), com faixa máxima de detecção de concentrações de 5000 a 10000 mg/l para sedimentos lamosos.

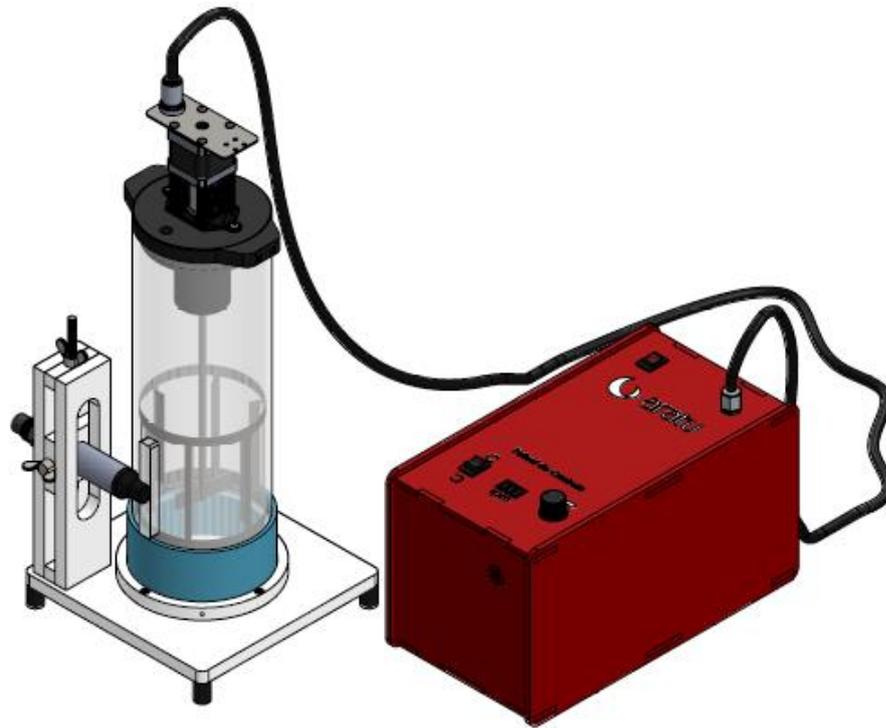


Figura 4: Representação esquemática da Câmara para Teste de Erodibilidade – CATER equipada com Sensor Óptico de Retrodispersão (OBS) posicionado a 10 cm de profundidade. Fonte: Empresa Aratu equipamentos de pesquisa.

2.4.1 Calibração do CATER

Para conversão das rotações da hélice (RPM) em tensão de cisalhamento, a curva de calibração de Shields foi escolhida como método na determinação desses valores baseado na erosão de areias de quartzo com tensão de cisalhamento conhecidas. Como o CATER foi utilizado principalmente em sedimentos coesivos, a calibração utilizou o menor tamanho de grão para o qual ainda era possível observar o movimento. Assim, foram utilizadas 6 granulometrias: 125; 177; 250; 350; 500 e 710 μm .

O sedimento a ser analisado foi acomodado na base do equipamento e então o interior do tubo foi preenchido com água do mar padrão. Em seguida a hélice foi posicionada a 4 cm acima da superfície para cada tamanho de grão a ser investigado (Tabela 1). No painel de controle do equipamento a velocidade da hélice foi aumentada em 1 RPM a cada 10 segundos, a fim de definir com precisão o ponto (em RPM) em que o sedimento começou a se mover. Os testes foram repetidos por 3 vezes para cada tamanho de grão analisado. O critério

para determinar o limiar do movimento de sedimentos foi a observação a olho nu do primeiro movimento dos grãos (Paphitis, 2001).

Tabela 1: Os tamanhos dos grãos da areia de quartzo utilizados na calibração e seu ponto de movimento inicial (RPM).

Tamanho do grão (μm)	Início do Movimento (RPM)
125	110 \pm 1,7
177	103 \pm 2,5
250	142 \pm 14,36
350	176 \pm 3,2
500	184 \pm 7,6
710	204 \pm 3,2

A curva empírica utilizada para a calibração relaciona a tensão de cisalhamento crítica do fundo à granulometria do sedimento. Paphitis (2001) estendeu o trabalho de Shields e outros. O autor op cit propôs "reexaminar a relação entre os parâmetros empregados em alguns dos diagramas de limiar mais utilizados", em que fórmulas empíricas foram ajustadas aos envelopes representando o movimento inicial das partículas (limite inferior) e o início do transporte de sedimentos em massa (limite superior). Essas fórmulas definem os valores médios das velocidades. Para essa calibração, foi escolhido o uso do diâmetro adimensional do grão (Equação 3) (Van Rijn, 1993):

$$D^* = \left[\frac{Re^{*2}}{\theta_{cr}} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v^2} \right]^{\frac{1}{3}} * D \quad \text{Equação 3}$$

Onde Re^* é o número de Reynolds, θ_{cr} é o parâmetro Shields, ρ_s and ρ são as densidades do sedimento e fluido respectivamente, ν é a viscosidade cinemática da água e D é o diâmetro do grão.

Os parâmetros de Shields foram calculados utilizando as fórmulas analíticas para o limite inferior (Paphitis, 2001) (Equação 4), uma vez que estava trabalhando com o movimento inicial (o uso da curva média seria uma predição excessiva do estresse).

$$\theta_{cr} = \left(\frac{0.165}{0.7} + 1.2D^* \right) + 0.0300(1 - 0.576e^{-0.02D^*}) \quad \text{Equação 4}$$

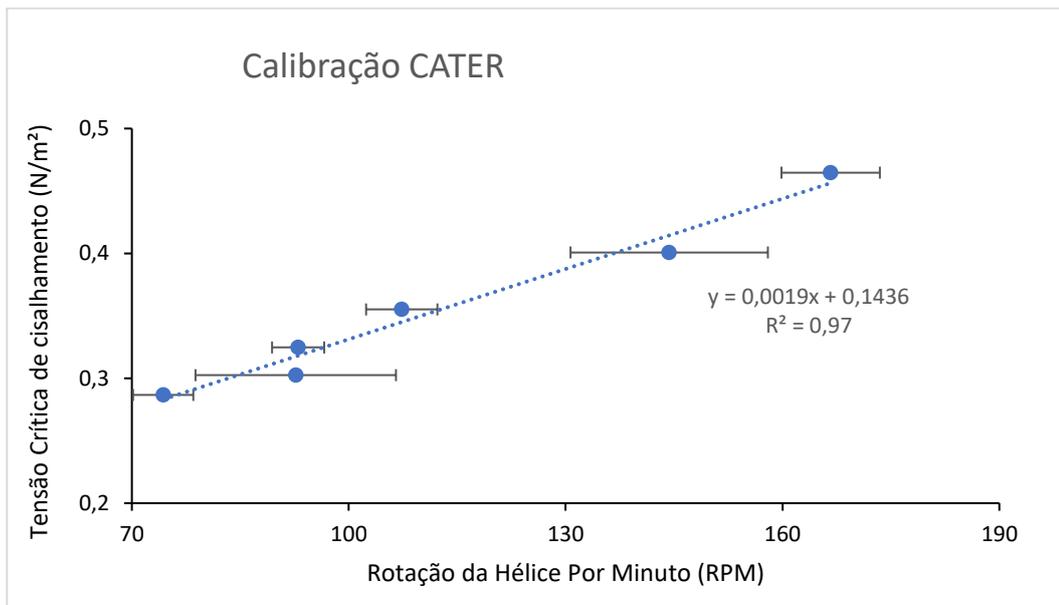


Figura 5: Curva de calibração utilizando grãos de areia de quartzo.

2.4.2 Calibração do Sensor Óptico de Retrodispersão (OBS)

Os sensores OBS vem de fábrica previamente calibrados com uma substância química, no entanto, é recomendado uma nova calibração com amostras de sedimento do local a ser estudado (Butt, et. al., 2002; Campbell Scientific; 2012). Nesse contexto, foram realizadas calibrações para cada amostra de sedimento utilizado durante os experimentos.

As leituras de turbidez foram realizadas no próprio CATER com a hélice ligada afim de homogeneizar o material durante a leitura e desconsiderar qualquer influência na leitura que a parede do equipamento pudesse resultar. Assim, o erro associado entre um experimento e outro é o mesmo e, portanto, pode ser desconsiderado. Para a calibração foram utilizados incrementos do sedimento seco, no interior do tubo do CATER com 2,4 L de água do mar padrão.

Uma regressão linear foi ajustada a um gráfico de Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) contra os valores de turbidez. Na qual foi usado para converter os valores de Turbidez (NTU) em CSS nos experimentos (Fig. 6).

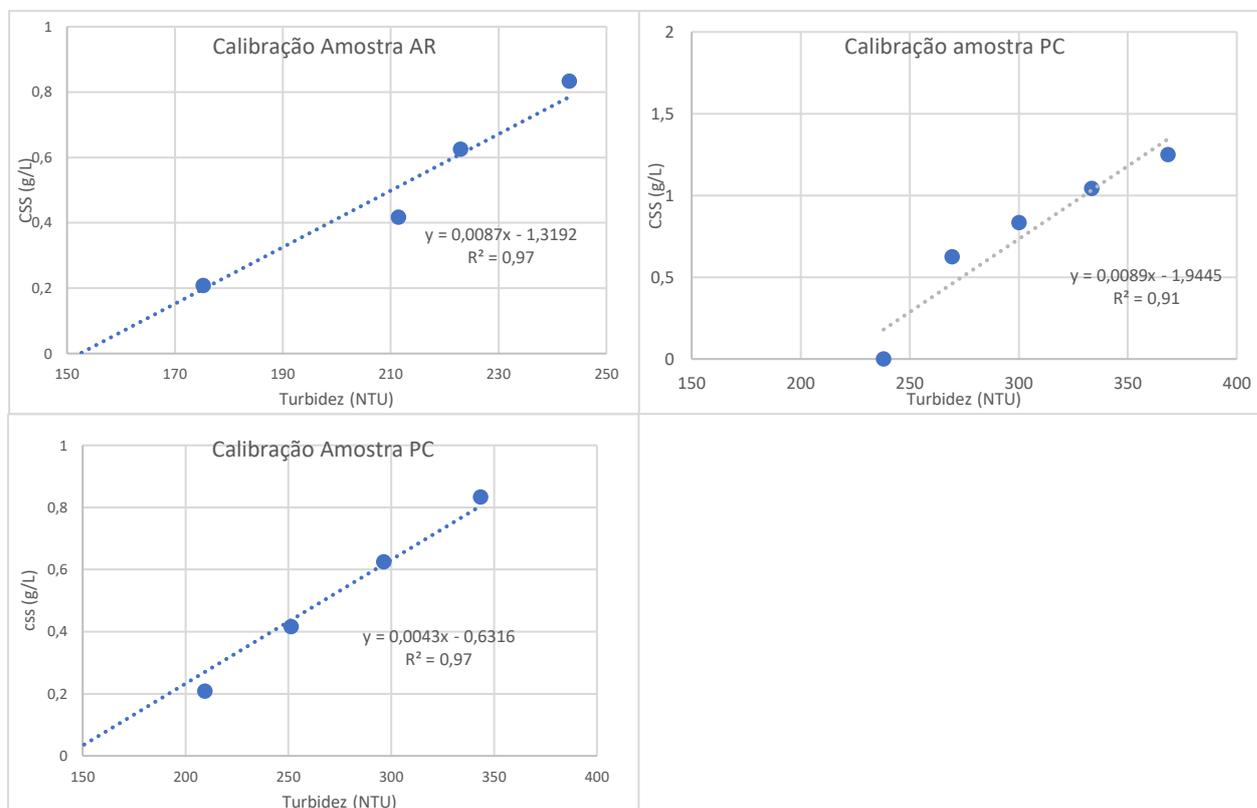


Figura 6: Calibração do OBS das amostras AR, PC e PCL. Demais calibrações realizadas estão no Apêndice B.

2.5 Testes de Erodibilidade

O CATER foi utilizado para a realização dos testes de erodibilidade e de decantação dos sedimentos. A amostra a ser analisada foi acomodada na base do equipamento, que foi preenchido com 2,4 L de água do mar padrão com salinidade de 35. Antes de cada experimento, foi realizada a completa homogeneização das partículas, posteriormente o equipamento foi deixado em repouso em um local com temperatura controlada e ao abrigo de luz pelo tempo determinado durante os experimentos de consolidação, que variou de 6 a 48 horas, dependendo da amostra a ser analisada, a fim de se adquirir a densidade adequada.

Quando o pacote sedimentar atingiu o tempo de consolidação determinado pelos testes consolidação, o experimento foi iniciado. Os experimentos foram realizados utilizando vários incrementos de velocidade. Cada estágio foi mantido por um período fixo de 5 minutos, em que a concentração de sedimentos em suspensão foi determinada para cada um desses aumentos da velocidade da hélice com auxílio do OBS. A CSS é uma função da tensão de cisalhamento aplicada no fundo. Assim, os valores da CSS foram examinados para identificar o valor no ponto que a turbidez na coluna começou a aumentar, para determinar a tensão crítica de cisalhamento. A taxa de erosão foi estimada pela equação 5, utilizando a CSS inicial e final a cada 30 segundos dentro de cada incremento de velocidade:

$$E_m = \delta M / \delta t = (S_{final} - S_{inicial}) V / \Delta t \alpha, \quad \text{Equação 5}$$

onde M é a massa seca erodida em gramas, V é o volume do CATER (0,00032m³), α é a área do CATER (0,0078 m²) e Δt é a variação do tempo (Amos et al., 2000a). Os experimentos de erodibilidade tiveram a duração de 50 a 70 minutos.

O excesso de tensão de cisalhamento no fundo foi obtido através da equação 6.

$$\varepsilon = \tau_{cr} - \tau_c, \quad \text{Equação 6}$$

Onde τ_{cr} é a tensão crítica de cisalhamento do leito e τ_c a tensão de cisalhamento induzida pelo fluxo.

Ao final do experimento a hélice foi desligada e a decantação dos sedimentos foram medidos por mais 2 horas, para medir a variação da concentração de sedimentos em suspensão no interior do tubo durante o tempo de decantação.

3. RESULTADOS

3.1 Análise granulométrica e constituintes

A distribuição do tamanho das partículas da amostra AR é apresentada na figura 7, onde se observa que 54% da composição dessa amostra foi de silte e 46% de argila, com predominância de silte fino.

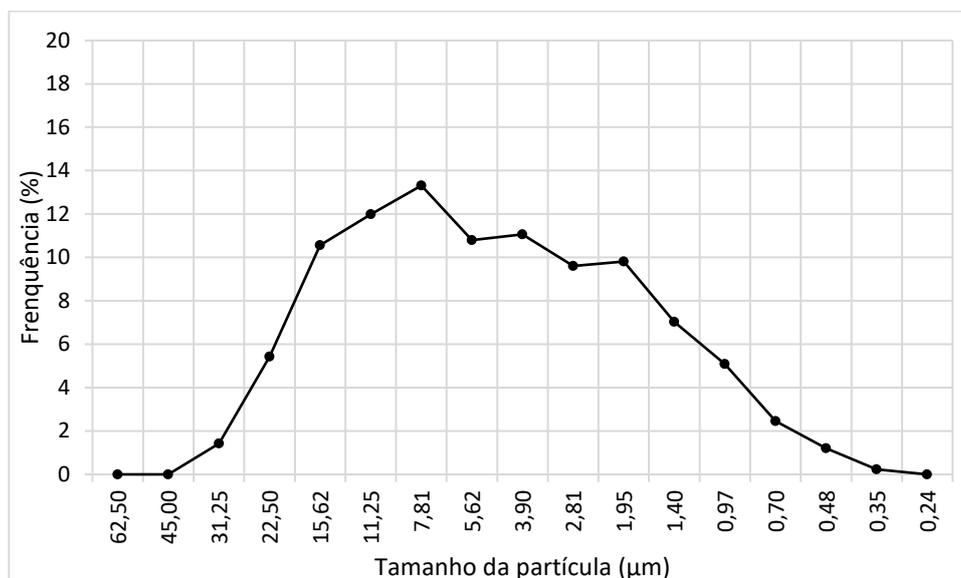


Figura 7: Distribuição do tamanho de partículas ($< 63\mu\text{m}$) da amostra AR de acordo com a classificação de Wentworth (1922).

Os resultados da análise mineralógica da argila industrial (AR) (Fig. 8), identificou que a maior parte da sua composição foi de Caulinita (46%), seguido pela Berlinita (30%). Além disto, essa amostra apresentou 3% de matéria orgânica.

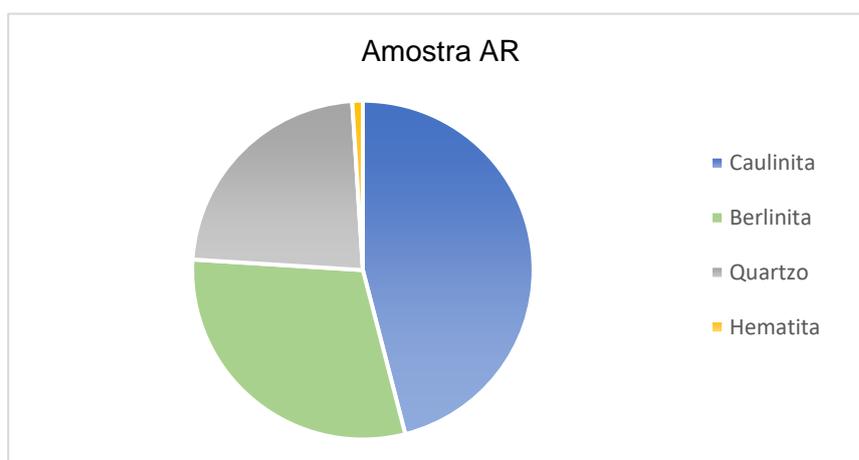


Figura 8: Percentuais mineralógicos da amostra AR.

A partir das análises granulométricas, a amostra PC apresentou 85% de sua composição de frações de silte e argila. A fração >63 μm teve predominância de areia muito fina (Fig. 9A). A amostra foi definida como silte grosso com diâmetro médio de grão de 22 μm (Fig. 9B). O conteúdo de matéria orgânica total foi de 14%, com densidade aparente úmida de 1218 kg m^{-3} . Em relação a porcentagem de carbonato de cálcio, a amostra apresentou conteúdo de 16%.

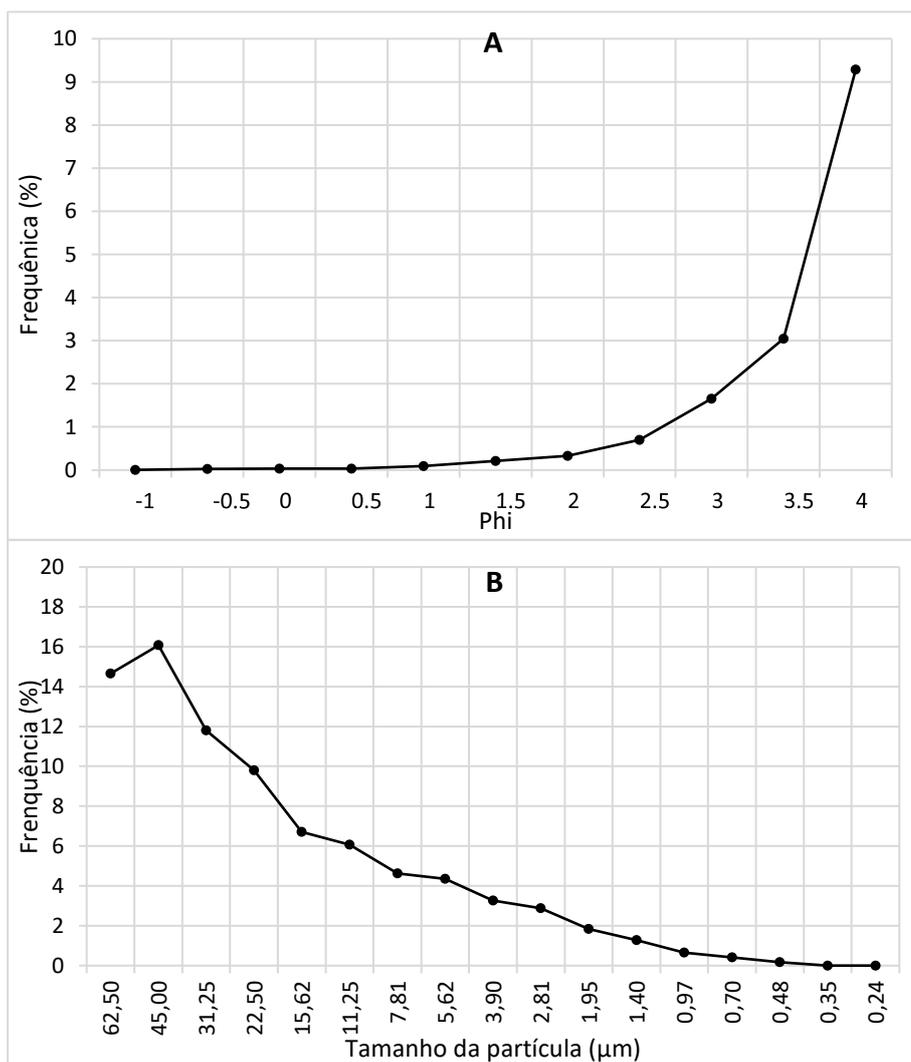


Figura 9: A) Distribuição do tamanho de partículas da fração arenosa (>63 μm). B) Distribuição do tamanho de partículas (< 63 μm) de acordo com a classificação de Wentworth (1922).

A análise mineralógica da amostra PC/PCL (Fig. 10) mostrou o predomínio de Sílica e Caulinita (57%), seguido pela Aragonita (27%).

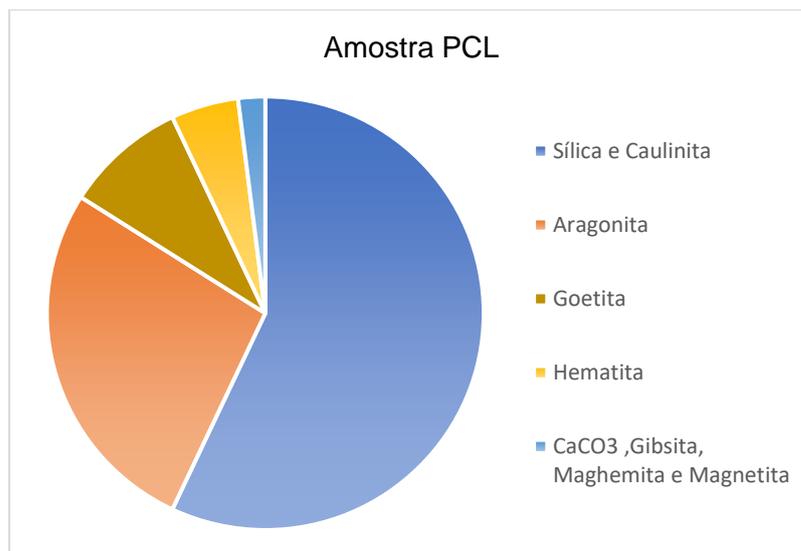


Figura 10: Percentuais mineralógicos da amostra PCL.

A porcentagem de Matéria Orgânica total da amostra PCL foi de 22%. E 18% de carbonato de cálcio.

3.2 Testes de Consolidação

O maior aumento da densidade para as amostras AR, PC e PCL ocorreram nas primeiras 12 horas de consolidação (Fig. 11). Para as amostras AR e PCL, durante as primeiras horas de decantação, a suspensão inicial era de uma lama fluida móvel ($\rho < 1100 \text{ kg m}^{-3}$) sujeito à decantação impedida. O tempo necessário para os sedimentos dessas amostras consolidarem de uma lama fluida móvel em uma lama fluida estacionária foi de 24 horas para AR e 6 horas para PCL. As amostras se consolidaram em um leito após 48 horas, atingindo as densidades de 1212 kg m^{-3} e 1289 kg m^{-3} para AR e PCL, respectivamente. Enquanto a amostra PC nas primeiras horas de decantação, o fundo formado já tinha características de uma lama fluida estacionária, com densidades entre 1080 e 1200 kg m^{-3} . Após 10 horas a densidade desejada para realizar os testes foi atingida ($\rho = 1239 \text{ kg m}^{-3}$).

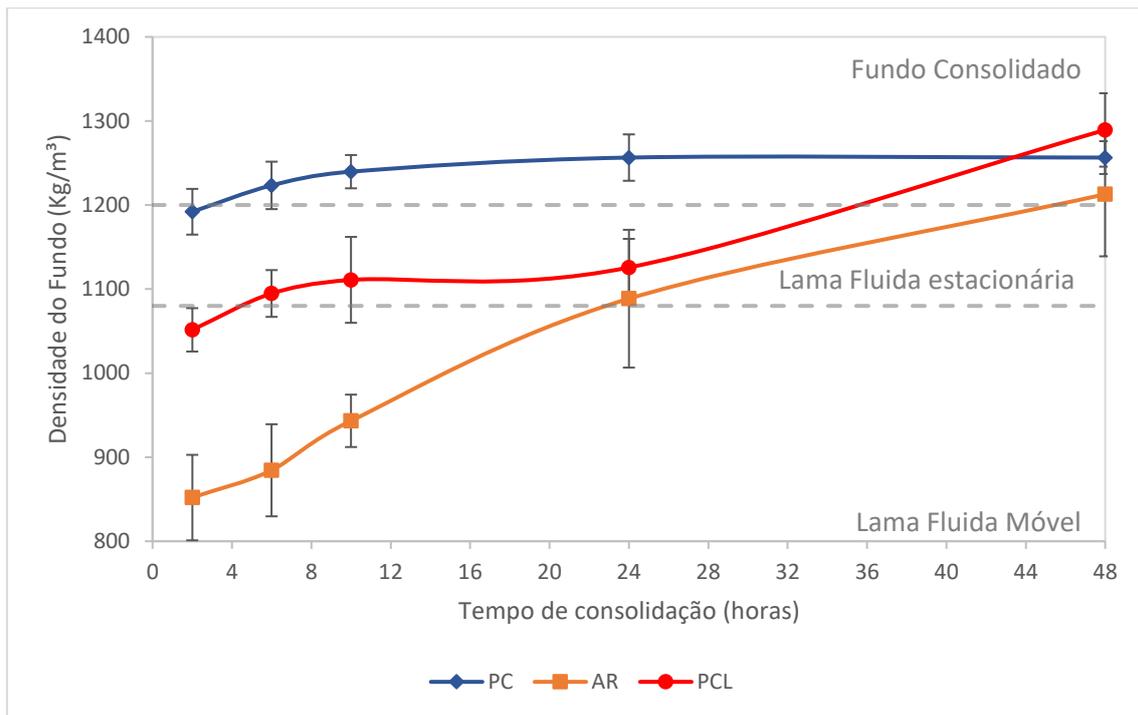


Figura 11: Densidade úmida versus tempos de consolidação das amostras PC, AR e PCL.

Os resultados dos testes de consolidação da amostra AR com diferentes teores de areia podem ser vistos na figura 12. Para 15% (AR15) e 30% (AR30) de areia, nas primeiras horas de consolidação o comportamento era de uma lama fluida móvel sujeito à decantação impedida, com densidades variando de 968 a 1045 kg m⁻³ para AR15 e 1005 a 1045 kg m⁻³ para a amostra AR30, o tempo necessário para o sedimento se consolidar de uma lama fluida móvel em uma lama fluida estacionária foi de 6 e 10 horas respectivamente. Após 24 horas de consolidação ambas as amostras formaram um fundo consolidado, com densidades de 1199 kg m⁻³ (AR15) e 1245 kg m⁻³ (AR30).

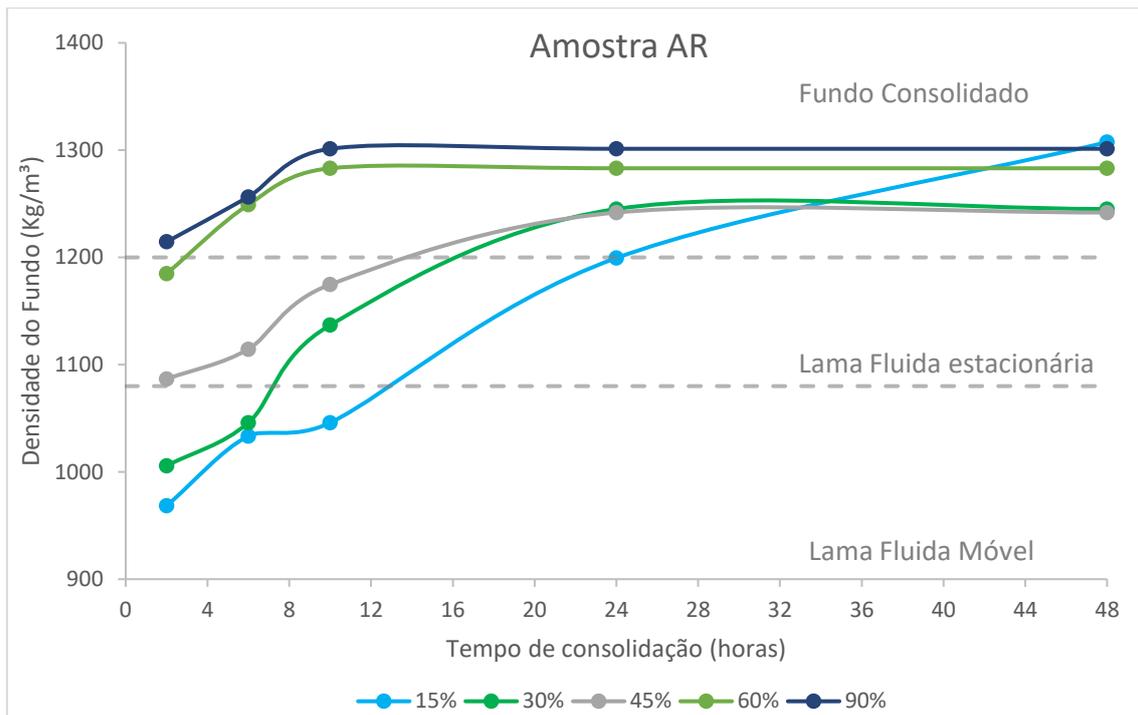


Figura 12: Densidade úmida versus tempos de consolidação das amostras AR com percentagens de 15 a 90% de areia.

A amostra de 45% (AR45) após 10 horas de consolidação passou de uma lama fluida estacionária para um fundo consolidado. Após 24 horas de consolidação a densidade do fundo era de 1241 kg m^{-3} .

Para AR60, a consolidação primária ocorreu após duas horas, seguida pela consolidação secundária, e em 6 horas o fundo apresentava densidade de 1249 kg m^{-3} . Enquanto para 90% (AR90) nas primeiras 6 horas de consolidação o fundo já apresentava características de um fundo consolidado, com densidade de 1256 kg m^{-3} .

Nenhum dos fundos das amostras PC com diferentes teores de areia apresentaram características de uma lama fluida móvel (Fig. 13). As amostras de 30% (PC30) e 45% (PC45) mostraram os efeitos da consolidação primária e secundária, após 10 e 6 horas respectivamente, e passaram de um fundo de lama fluida estacionária para um fundo consolidado, com densidades de 1201 kg m^{-3} (PC30) e 1236 kg m^{-3} (PC45). Para 60 e 90% o material já apresentava características de um fundo consolidado nas primeiras 2 horas de experimento, atingindo densidades de 1207 kg m^{-3} (PC60) e 1251 kg m^{-3} (PC90).

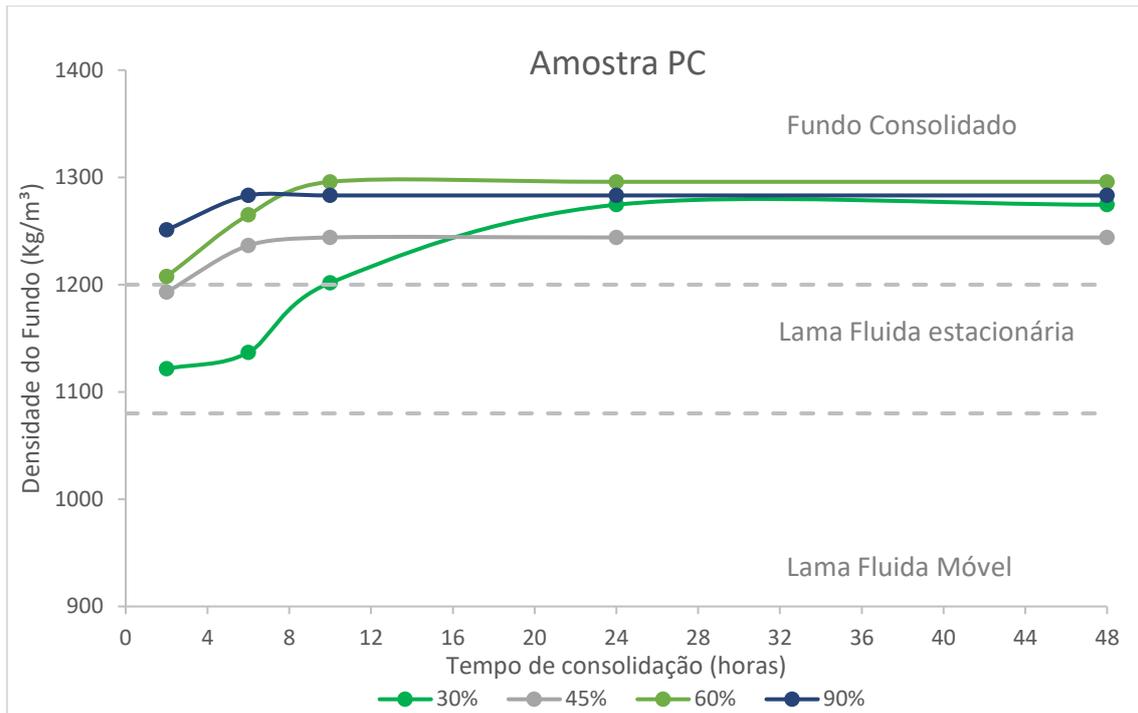


Figura 13: Densidade úmida versus tempos de consolidação das amostras PC com porcentagens de 30 a 90% de areia.

Para as amostras PCL com diferentes porcentagens de areia (Fig.14), apenas a amostra de 15% (PCL15) apresentou características de uma lama fluida móvel nas primeiras horas de consolidação. Com 48 horas essa amostra formou um fundo consolidado com densidade de 1222 kg m^{-3} . As amostras de 30 (PCL30) e 45% (PCL45) apresentaram características de lama fluida estacionária nas primeiras horas. Após 10 horas de consolidação, as densidades eram de 1246 e 1234 kg m^{-3} , já com características de um fundo consolidado. Também após 10 horas, a amostra PCL60 apresentou uma densidade calculada de 1213 kg m^{-3} . Enquanto para PCL90, duas horas de consolidação foram suficientes para que a densidade atingida fosse de 1224 kg m^{-3} .

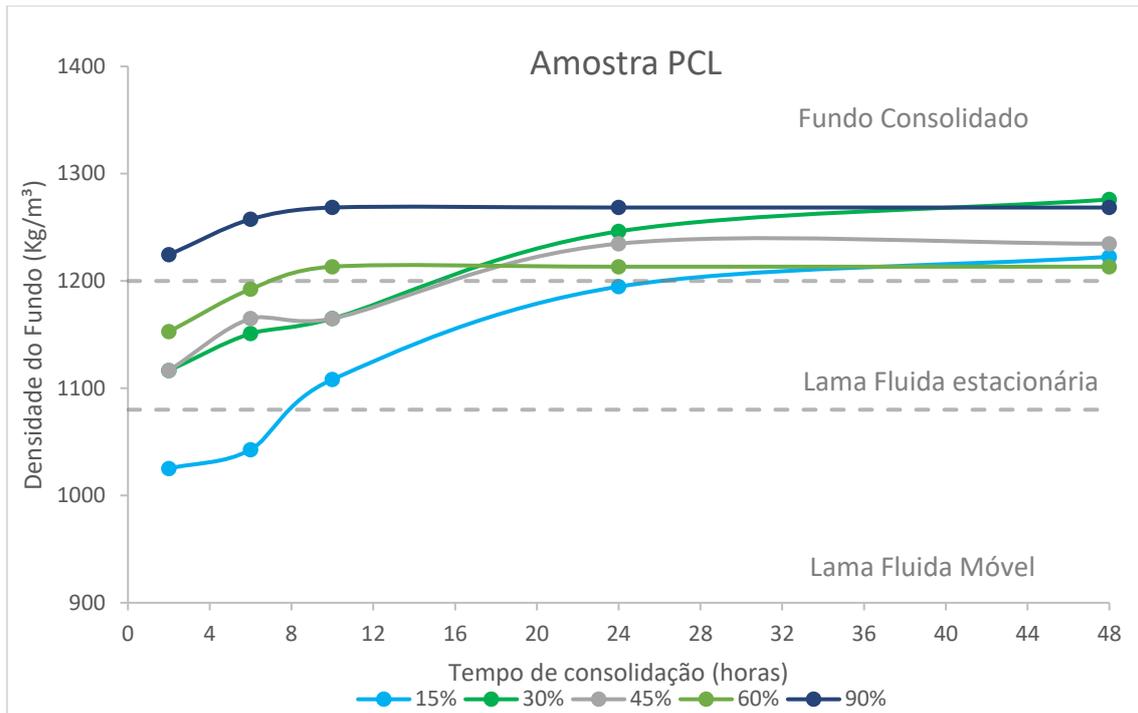


Figura 14: Densidade úmida versus tempos de consolidação das amostras PCL com percentagens de 30 a 90% de areia.

3.3 Testes de erodibilidade

Amostra AR

Conforme pode ser visto na figura 15A, a erosão começou logo após a velocidade da hélice atingir 100 RPM (equivalente a $0,31 \pm 0,02$ N/m² de tensão de cisalhamento no fundo) cerca de 15 minutos após o início do experimento. A média inicial de CSS foi de $0,05 \pm 0,02$ g/L. Após a tensão crítica de cisalhamento ser atingida, o fundo continuou a ser erodido até uma tensão de cisalhamento de $0,5$ N/m² (180 RPM) chegando a $9,18 \pm 0,05$ g/L na média das concentrações de sedimentos em suspensão.

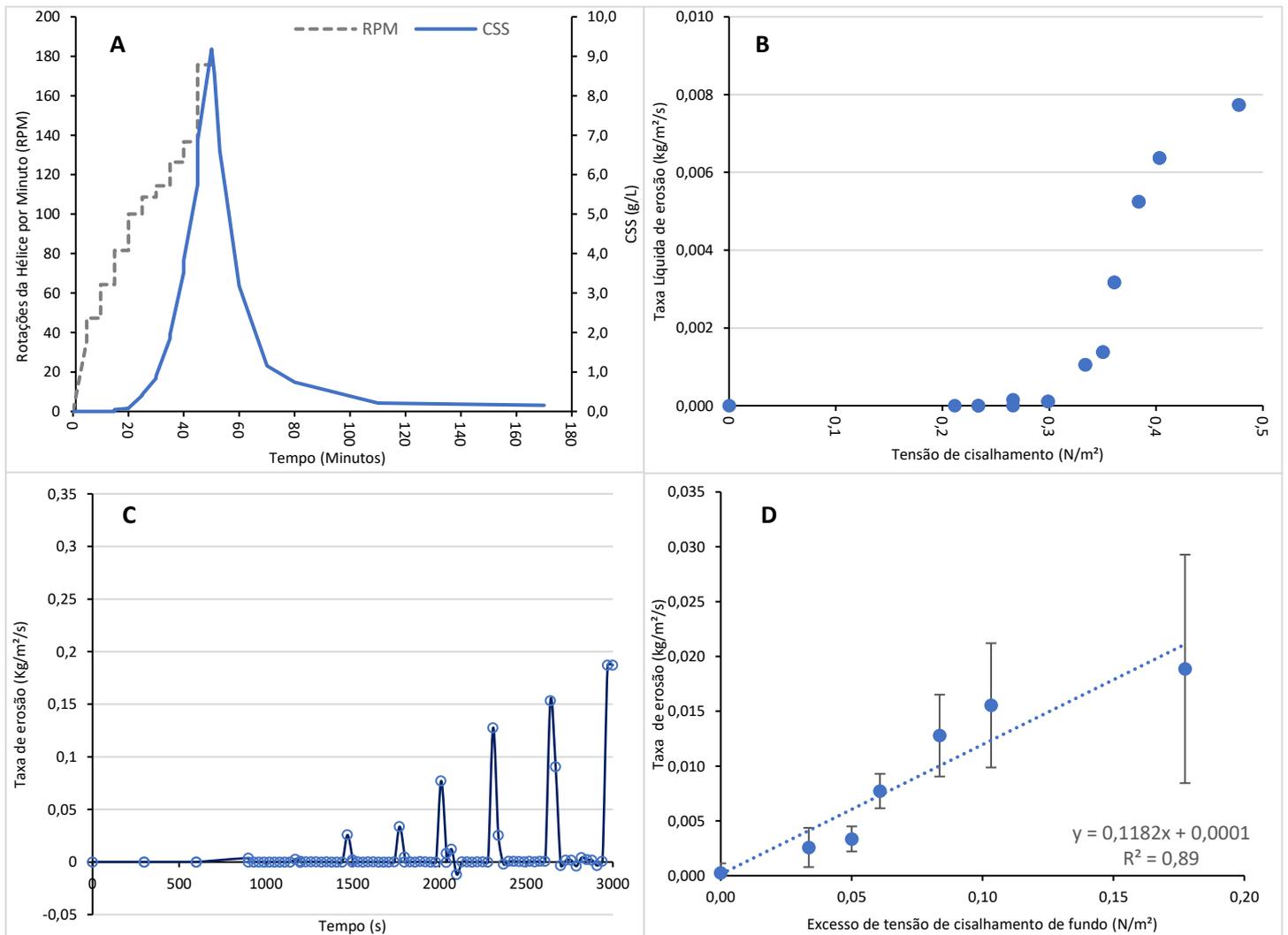


Figura 15: Experimentos de erodibilidade da amostra AR. A) Série temporal de medições; B) Taxas líquidas de erosão versus Tensão de cisalhamento do fundo; C) Taxas de erosão em relação ao tempo; D) Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo.

A média nas taxas líquidas de erosão para essa amostra foi de $2,5 \times 10^{-3}$ kg/m²/s. Após cada aplicação de uma nova tensão de cisalhamento no fundo, as taxas de erosão apresentaram picos, indicando que as maiores variações nas taxas foram quando o fundo foi submetido a uma nova tensão. Em contrapartida, as menores variações das taxas foram dentro do mesmo incremento de velocidade (Fig. 15C).

Após 15 min de experimento, a erosão foi caracterizada por um pequeno aumento da CSS (0,05 g/L), com valores de taxa de erosão de $2,6 \times 10^{-3}$ kg/m²/s.

Entre 0,36 e 0,48 N/m² de tensão medida, as taxas de erosão aumentaram significativamente, apresentando um pico de $7,7 \times 10^{-3}$ kg/m²/s. Para a amostra AR, a taxa de erosão teve uma relação direta com a tensão de cisalhamento no fundo (Fig. 15D), aumentando linearmente com o excesso de tensão de cisalhamento ($R^2 = 0,89$).

Amostra PC

A série temporal da CSS é mostrada na figura 16A, onde se observa que a tensão crítica de cisalhamento ocorreu quando a velocidade da hélice atingiu $119 \pm 1,5$ RPM (equivalente a 0,36 N/m² de tensão de cisalhamento no fundo), por volta de 35 minutos após o início do experimento. Nessa etapa as CSS eram de $0,35 \pm 0,06$ g/L. A erosão ocorreu até a tensão de cisalhamento de 0,55 N/m² (207 RPM), atingindo valores de $7,5 \pm 0,26$ g/L de CSS. Além disso, a curva de CSS mostra um padrão mais escalonado (Fig. 16A) de erosão quando comparado aos outros dois tipos de fundo (AR e PCL).

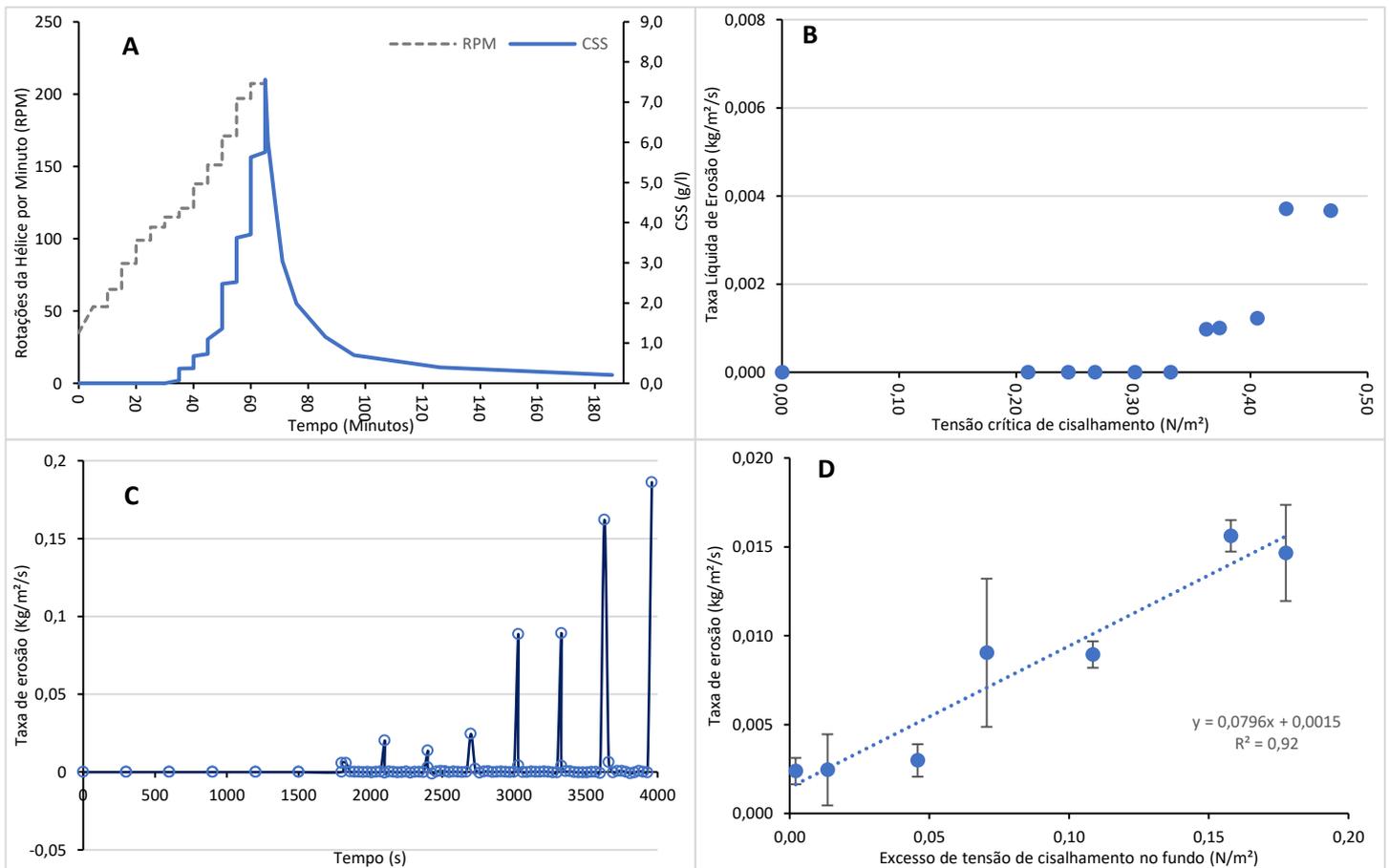


Figura 16: Experimentos de erodibilidade amostra PC. A) Série temporal de medições. B) Taxa líquida de erosão versus tensão de cisalhamento do fundo; C) Taxa de erosão em relação ao tempo. D) Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo.

As taxas de erosão se mantiveram baixas após o fundo começar a erodir decorridos 15 minutos do experimento, com picos entre $5,7 \times 10^{-3}$ e $2,4 \times 10^{-2}$ kg/m²/s (Fig. 16C). Em tensões de cisalhamento no fundo acima de 0,47 N/m² (50 minutos após o início do experimento), a taxa de erosão atingiu valores de $8,93 \times 10^{-2}$ kg/m²/s, com taxas líquidas de erosão até duas vezes maiores que as taxas anteriores (Fig. 16B). Como pode ser visto na figura 13D, as taxas de erosão apresentaram alto coeficiente de determinação ($R^2=0,92$) com o excesso de tensão de cisalhamento no fundo, na qual as taxas aumentaram de maneira linear com o aumento do excesso de tensão de cisalhamento no fundo.

Amostra PCL

Para amostra PCL, a erosão teve início quando as rotações da hélice atingiram 138 RPM (equivalente a $0,44 \pm 0,01$ N/m² de tensão de cisalhamento no fundo; Fig.17A), 45 minutos após o início do experimento. A média inicial de CSS foi de $0,13 \pm 0,002$ g/L. A erosão continuou por mais 10 minutos até a tensão de cisalhamento de 0,47 (170 RPM), onde a CSS chegou à concentração média de $4,3 \pm 0,1$ g/L.

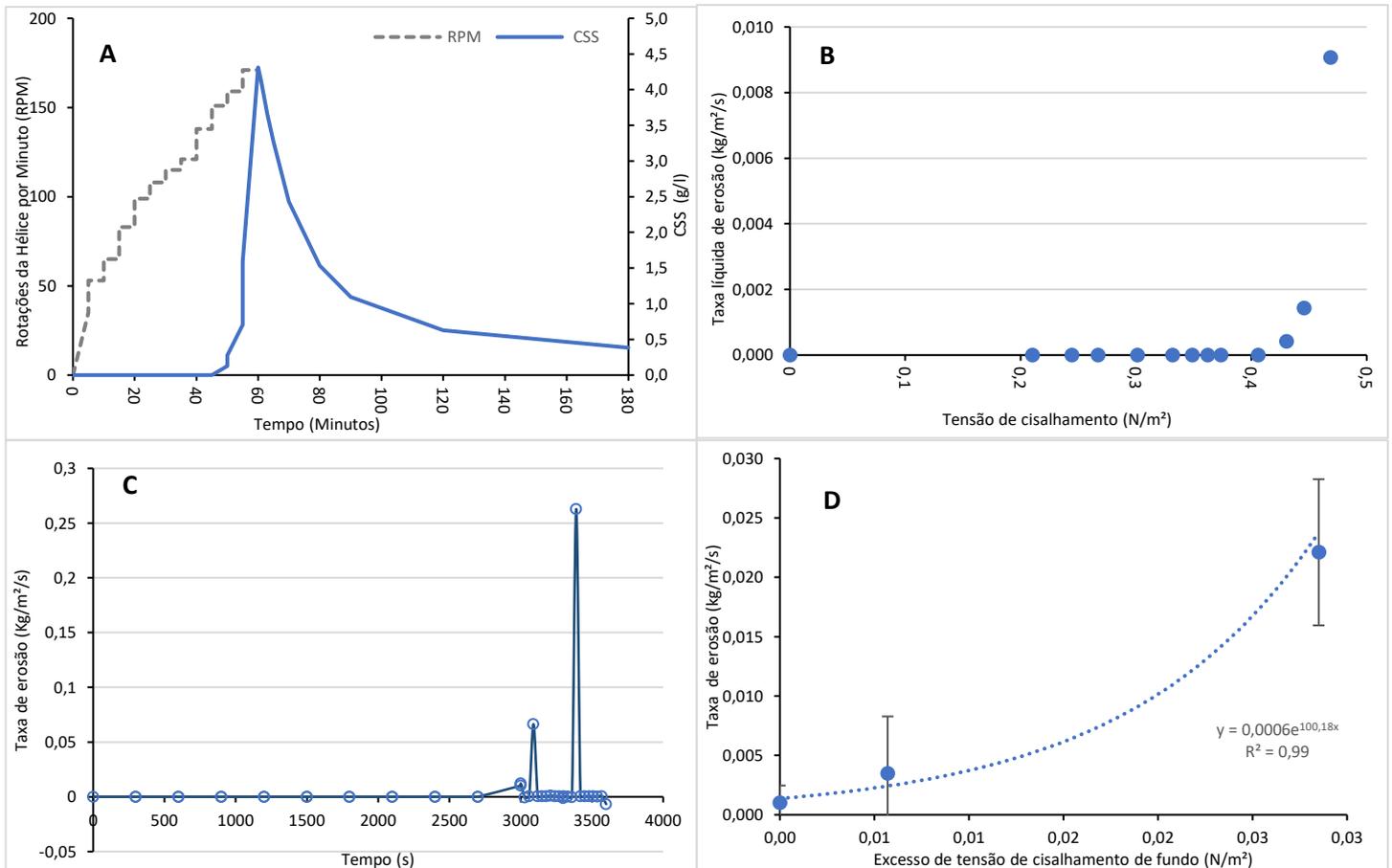


Figura 17: Experimentos de erodibilidade amostra PCL. A) Série temporal de medições. B) Taxa líquida de erosão versus tensão de cisalhamento do fundo; C) Taxa de erosão em relação ao tempo; D) Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo.

A média da taxa líquida de erosão foi de $9,1 \times 10^{-4}$ kg/m²/s, sendo o menor valor registrado em relação aos experimentos realizados sem adição de areia. As taxas de erosão aumentaram rapidamente após a tensão de cisalhamento exercida no fundo exceder a tensão crítica de cisalhamento. Em tensões de cisalhamento entre 0,42 e 0,45 N/m², a taxa de erosão apresentou média de 2 x

10^{-3} kg/m²/s. Em tensões acima de 0,45 N/m², a taxa de erosão atingiu valores de $6,64 \times 10^{-2}$ kg/m²/s, onde todo material foi rapidamente ressuspensionado (Fig. 17C). As taxas de erosão foram bem explicadas pelo modelo exponencial ($R^2=0,99$) (Fig. 17D).

3.4 Testes de erodibilidade das amostras com adição de areia

Amostra AR

Os testes de erodibilidade utilizando a amostra AR com diferentes porcentagens de areia (Fig. 18), apontaram variações na tensão crítica de cisalhamento entre 0,31 e 0,37 N/m². O maior valor observado foi para a porcentagem de 15%, seguido por 45 e 90%. Já o menor valor ficou para as amostras com 30 e 60% de areia.

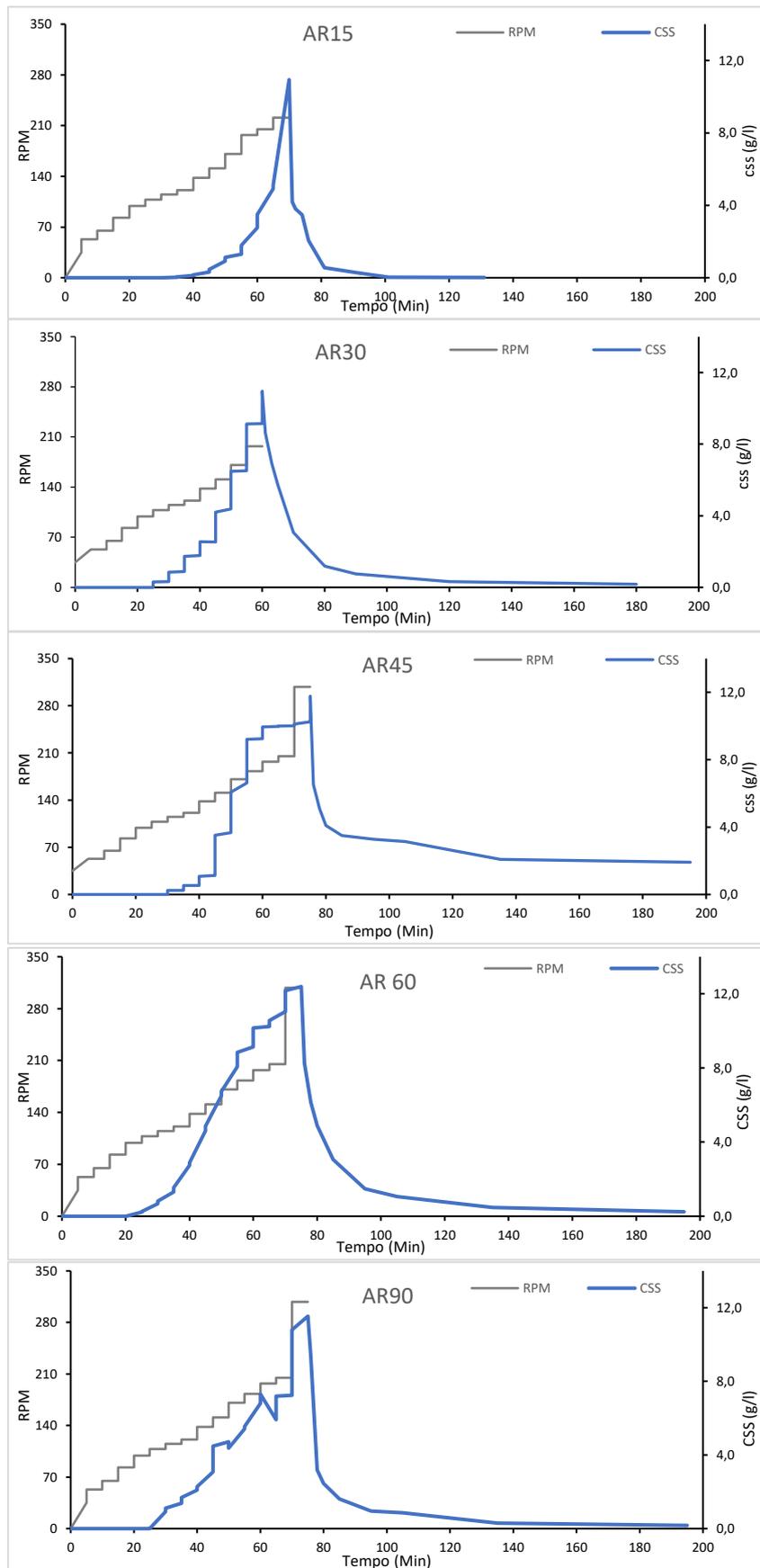


Figura 18: Série temporal de medições dos testes de erodibilidade utilizando a amostra AR com 15 a 90% de areia.

A erosão da amostra AR15 ocorreu 35 minutos após o início do experimento, com as rotações da hélice entre 115 e 120 RPM, em tensões de cisalhamento no fundo de $0,36 \pm 0,01$ N/m². A média na CSS foi de $0,03 \pm 0,02$ g/L para esse início da erosão. O teste ocorreu até a tensão de cisalhamento de $0,56$ N/m², chegando à concentração média de $10,94 \pm 0,07$ g/L.

Para AR30 e AR60, a erosão teve início após 25 minutos, com tensão crítica de cisalhamento de $0,34 \pm 0,01$ N/m². O experimento para 30%, ocorreu até tensões de cisalhamento de $0,52$ N/m² (200 RPM) atingindo uma CSS de $10,95$ g/L. A amostra AR60 foi submetida a uma tensão de cisalhamento de até $0,73$ N/m² (300 RPM), apresentando uma CSS de $12,39$ g/L.

As amostras AR45 e AR90 apresentarem valores de tensão crítica de cisalhamento: $0,35$ e $0,35 \pm 0,01$ N/m², respectivamente. O início da erosão ocorreu em rotações da hélice entre 106 e 112 RPM após 30 minutos de experimento. As concentrações iniciais de CSS eram de $0,16$ g/L (AR45) e $0,92 \pm 0,4$ g/L (AR90). A erosão de ambas as amostras ocorreu até uma tensão de cisalhamento de $0,73$ N/m², atingindo uma CSS média de 11 g/L.

Como pode ser visto na Figura 19, os resultados para a série de experimentos da amostra AR15 apresentaram uma boa medida do coeficiente de determinação ($R^2=0,83$) entre as taxas líquidas de erosão do leito e o excesso de tensão de cisalhamento no fundo, com aumento exponencial das taxas de erosão em relação ao aumento da tensão de cisalhamento. Já para AR30, as taxas de erosão estão linearmente relacionadas com as tensões de cisalhamento ($R^2=0,71$). Para o conteúdo de areia cima de 45%, houve um grau maior na dispersão das taxas de erosão.

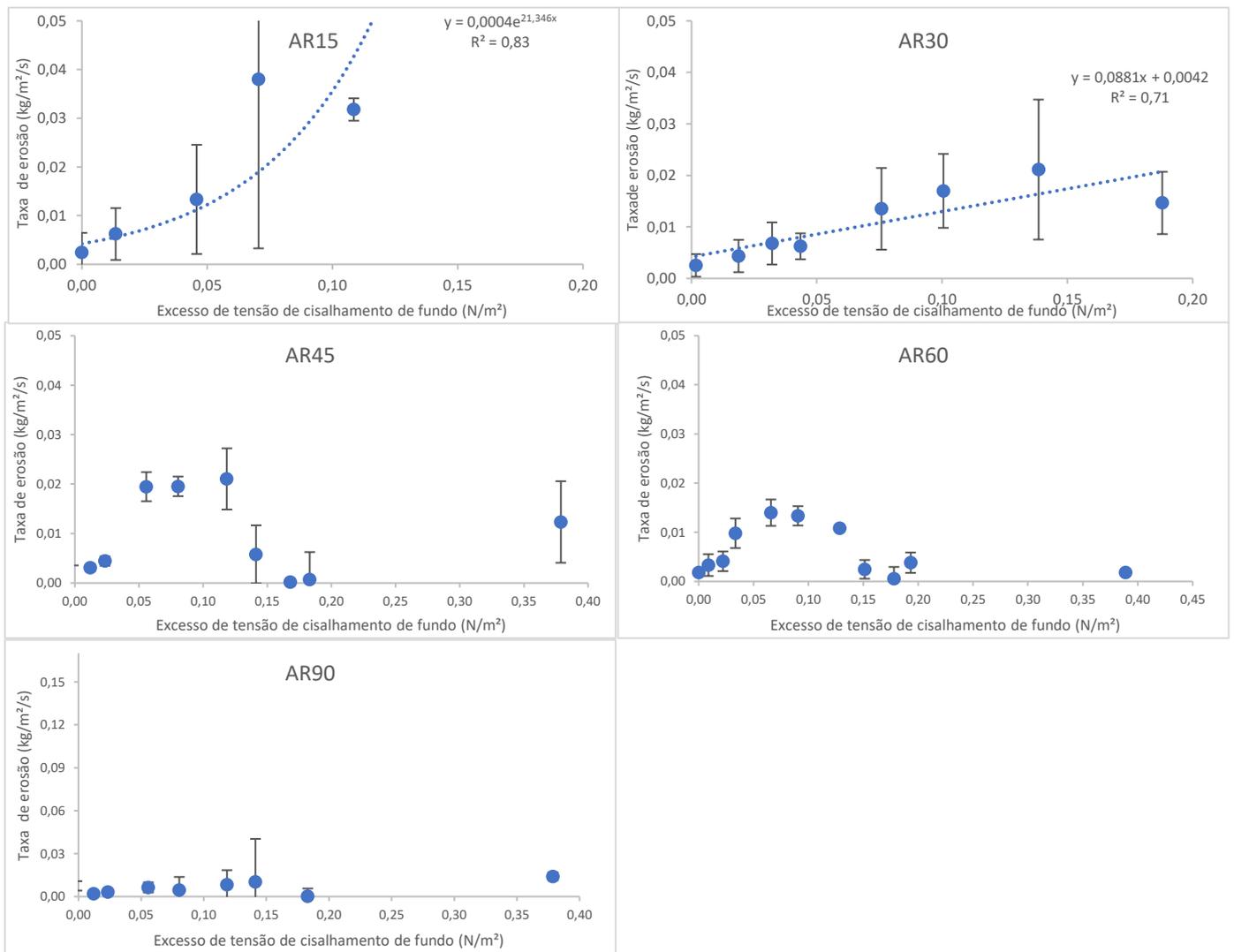
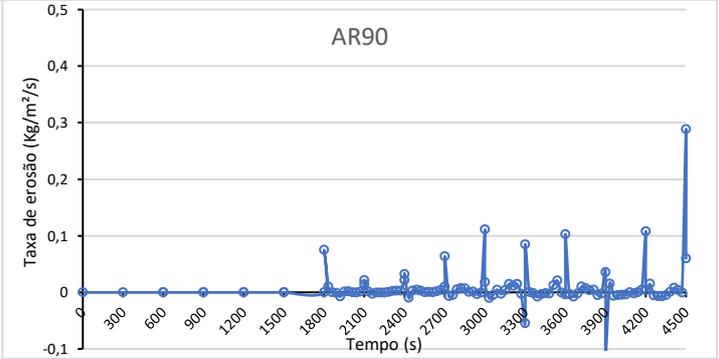
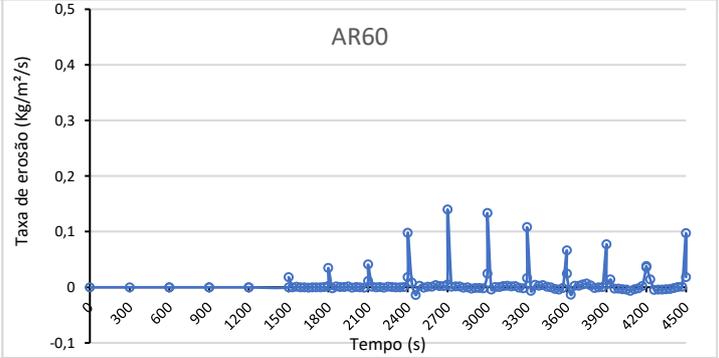
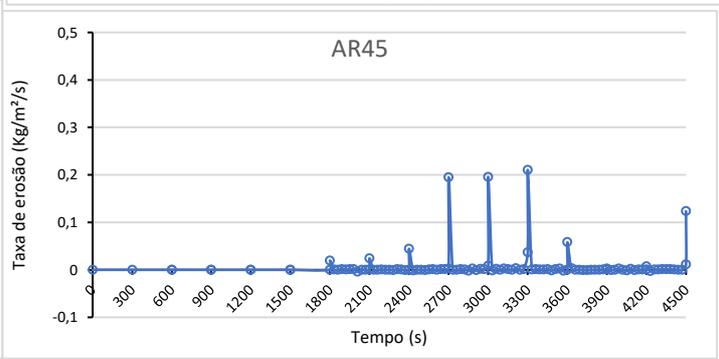
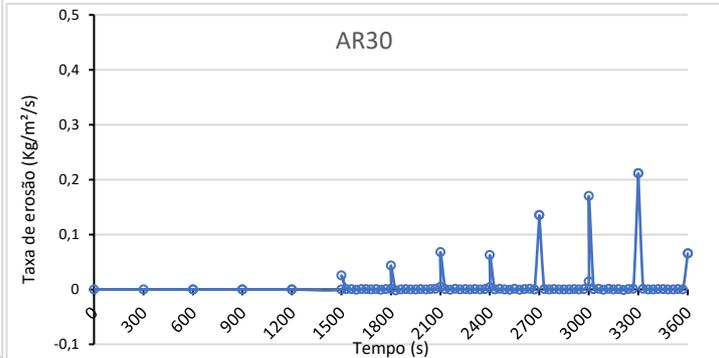
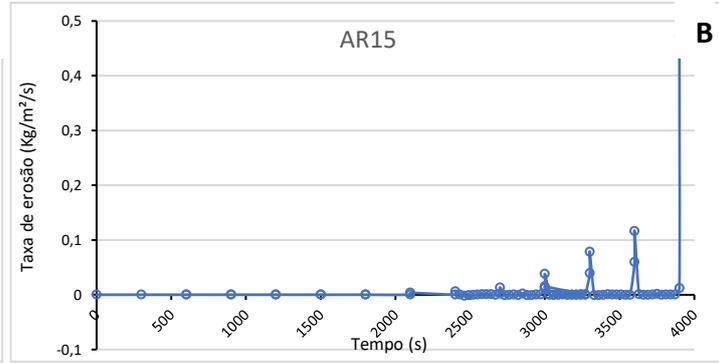
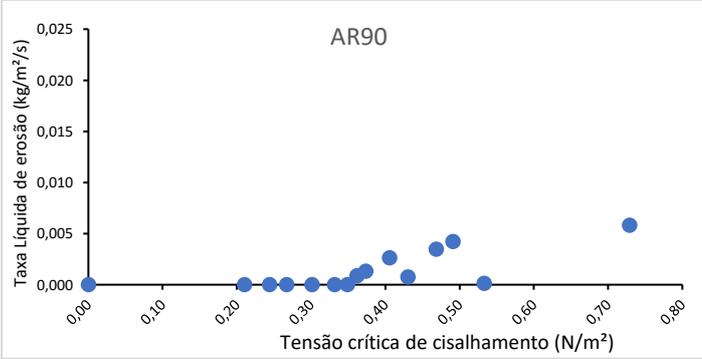
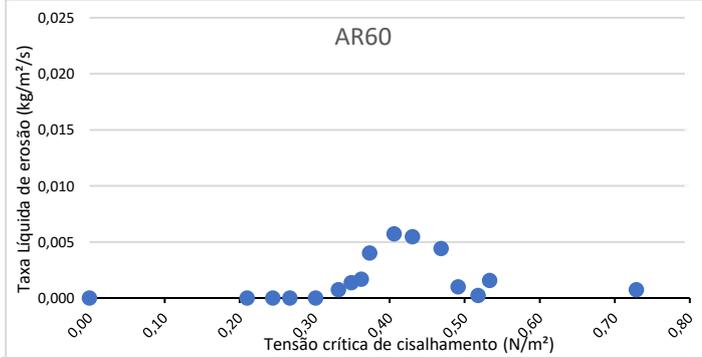
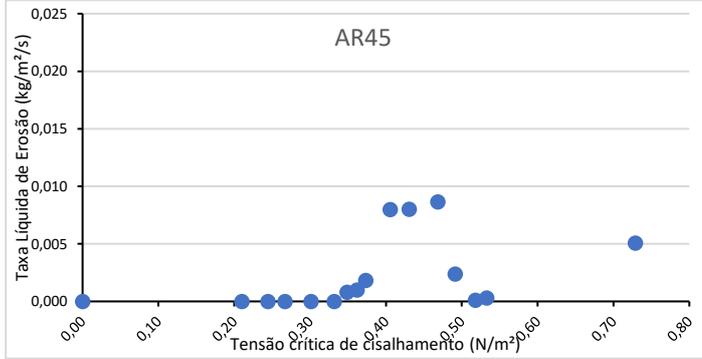
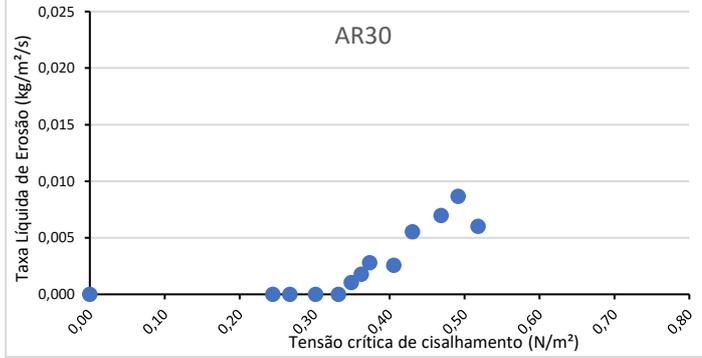
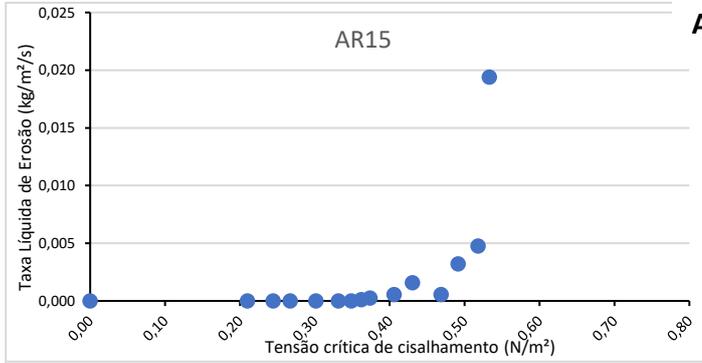


Figura 19: Taxas de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo para as amostras AR.

Para a amostra AR15 (Fig. 20), os experimentos apresentaram média de $2,1 \times 10^{-3}$ kg/m²/s nas taxas líquidas de erosão. As taxas de erosão permaneceram baixas em tensões de cisalhamento entre 0,36 a 0,49 N/m². Em tensões de cisalhamento acima de 0,49 N/m², as taxas de erosão atingiram o valor máximo de $4,7 \times 10^{-2}$ kg/m²/s, sendo também o maior valor registrado nas taxas de erosão das amostras AR.



A

B

Figura 20:(A) Taxa líquida de erosão versus tensão de cisalhamento de fundo dos testes de erodibilidade; (B)Taxa de erosão versus tempo decorrido do experimento utilizando a amostra AR com porcentagens de 15 a 30% de areia.

AR30 teve média de $2,9 \times 10^{-3}$ kg/m²/s nas taxas líquidas de erosão. As taxas de erosão registradas em tensões de cisalhamento do fundo entre 0,33 a 0,37 N/m² variaram de $2,5 \times 10^{-2}$ a $6,7 \times 10^{-2}$ kg/m²/s. Em tensões de cisalhamento acima de 0,41N/m², as taxas de erosão aumentaram consideravelmente, chegando a uma taxa de até $2,1 \times 10^{-1}$ kg/m²/s.

A amostra AR45 apresentou média de $2,4 \times 10^{-3}$ kg/m²/s nas taxas líquidas de erosão. Nos primeiros minutos do experimento, as taxas de erosão apresentaram valores entre $1,3 \times 10^{-2}$ kg/m²/s e $4,4 \times 10^{-2}$ kg/m²/s. Após tensões de cisalhamento de 0,41 N/m², as taxas de erosão começaram a aumentar, chegando a atingir $2,1 \times 10^{-1}$ kg/m²/s quando a tensão de cisalhamento no fundo era de 0,47N/m². Após esse tempo, foi observado nesse experimento e nos que se seguem, uma diminuição nas taxas de erosão à medida que a tensão de cisalhamento no fundo aumentava.

A média da taxa líquida de erosão da amostra AR60 foi de $1,8 \times 10^{-3}$ kg/m²/s. Para os experimentos realizados com essa amostra, as taxas de erosão também podem ser divididas em 3 fases, a primeira com um aumento mais lento nas taxas de erosão, com valores entre $1,7 \times 10^{-2}$ a $9,7 \times 10^{-2}$ kg/m²/s em tensões de cisalhamento entre 0,33 a 0,37N/m². Em tensões de cisalhamento no fundo acima de 0,41N/m², foi observado um aumento significativo nas taxas de erosão, com taxas de $1,4 \times 10^{-1}$ kg/m²/s. Acima dessa tensão de cisalhamento as taxas de erosão tenderam a diminuir.

A amostra AR90 apresentou média de $8,5 \times 10^{-4}$ kg/m²/s nas taxas líquidas de erosão. As taxas de erosão para essa amostra tiveram maiores variações ao longo do tempo, com os valores oscilando entre aumentos e quedas, chegando a atingir valores negativos, devido a deposição. A erosão foi marcada por um pico inicial na taxa de erosão de $7,4 \times 10^{-2}$ kg/m²/s em tensões de cisalhamento

de 0,35 N/m². O maior valor registrado nas taxas de erosão foi em tensão de cisalhamento no fundo de 0,49 N/m², com taxas de 1,0 x 10⁻¹ kg/m²/s.

Amostra PC

As séries temporais dos experimentos de erodibilidade para a amostra PC com diferentes porcentagens de areia podem ser vistos na figura 21.

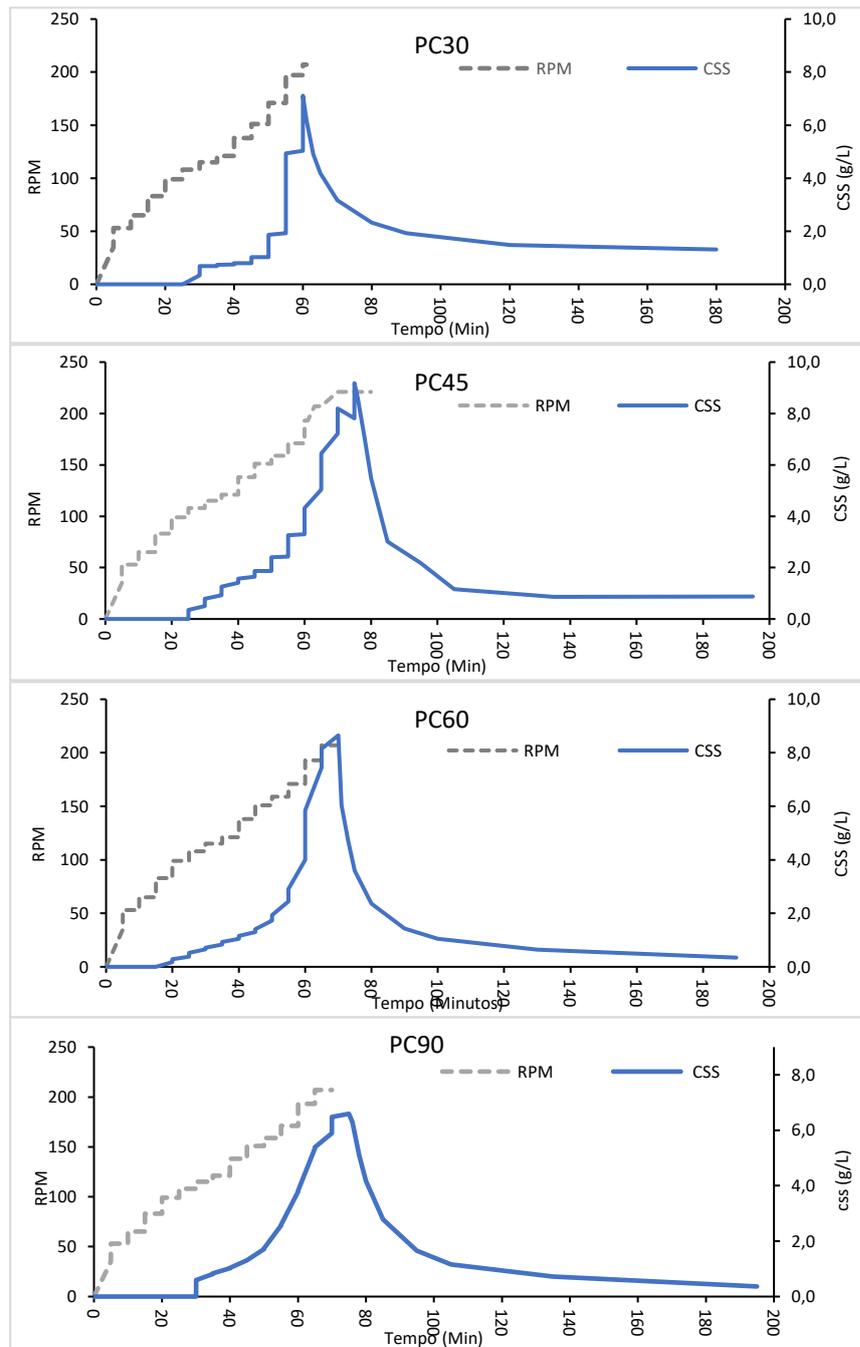


Figura 21: Série temporal de medições dos testes de erodibilidade utilizando a amostra PC com porcentagens de 30 a 90% de areia.

A amostra PC90 apresentou o maior valor de tensão crítica de cisalhamento. A erosão teve início quando a rotação da hélice atingiu 115 RPM, correspondente a $0,36 \text{ N/m}^2$ de tensão de cisalhamento no fundo, 30 minutos após o início do experimento. A média da concentração inicial foi de $0,6 \pm 0,08 \text{ g/L}$ de CSS. Quando a tensão de cisalhamento atingiu $0,56 \text{ N/m}^2$ (220 RPM), o experimento foi finalizado, com média da CSS de $6,5 \pm 0,03 \text{ g/L}$.

A amostra PC30 foi a segunda a apresentar os maiores valores de tensão crítica de cisalhamento. A erosão ocorreu quando as rotações da hélice estavam entre 105 e 115 RPM, equivalente a $0,35 \pm 0,01 \text{ N/m}^2$, para essa tensão de cisalhamento a CSS era de $0,34 \pm 0,1 \text{ g/L}$. Após 60 minutos de experimento, a CSS apresentou valor máximo de $7,1 \pm 0,8 \text{ g/L}$ a uma tensão de cisalhamento no fundo de $0,54 \text{ N/m}^2$ (205 RPM).

As amostras PC45 e PC60, apresentaram os menores valores de tensão crítica de cisalhamento: $0,33$ e $0,31 \pm 0,02 \text{ N/m}^2$, respectivamente. A erosão da amostra PC45 teve início em 100 RPM, 25 minutos após o início do experimento. Nessa etapa, a média da CSS era de $0,35 \pm 0,1 \text{ g/L}$. A erosão ocorreu até a rotação da hélice atingir 220 RPM, correspondente a $0,56 \text{ N/m}^2$. Já para a amostra PC60, a erosão teve início 15 minutos após iniciar o experimento, com rotações da hélice de 80 RPM, a média da CSS para esse início da erosão foi de $0,18 \pm 0,06 \text{ g/L}$. Em tensões de cisalhamento de $0,54 \text{ N/m}^2$ (205 RPM), a média da CSS era de $8,65 \pm 0,08 \text{ g/L}$.

Para as taxas de erosão dos experimentos da amostra PC, houve uma diminuição à medida que a porcentagem de areia aumentava. Além deste fato, o coeficiente de determinação (R^2) também tenderam a diminuir à medida que o conteúdo de areia aumentou, com exceção da amostra de 45%. Como pode ser visto na figura 22, a amostra PC30 teve um menor ajuste do modelo ($R^2=0,74$) em relação à amostra PC45 ($R^2= 0,95$), na qual as taxas de erosão foram bem explicadas pelo modelo exponencial. As taxas de erosão de ambas as amostras aumentaram exponencialmente com o aumento no excesso de tensão de cisalhamento no fundo. Apesar do menor ajuste ($R^2=0,55$) para PC60, a taxa de erosão também apontou para uma tendência de aumentar exponencialmente com o excesso de tensão de cisalhamento no fundo. Já a amostra PC90

apresentou um grau maior de variação nas taxas de erosão, embora a dispersão tenha sido alta, a taxa de erosão também tendeu a aumentar com o aumento da tensão de cisalhamento no fundo. Uma queda nesses valores foi observada apenas no final do experimento, quando o excesso de tensão de cisalhamento no fundo estava acima de 0,15 N/m².

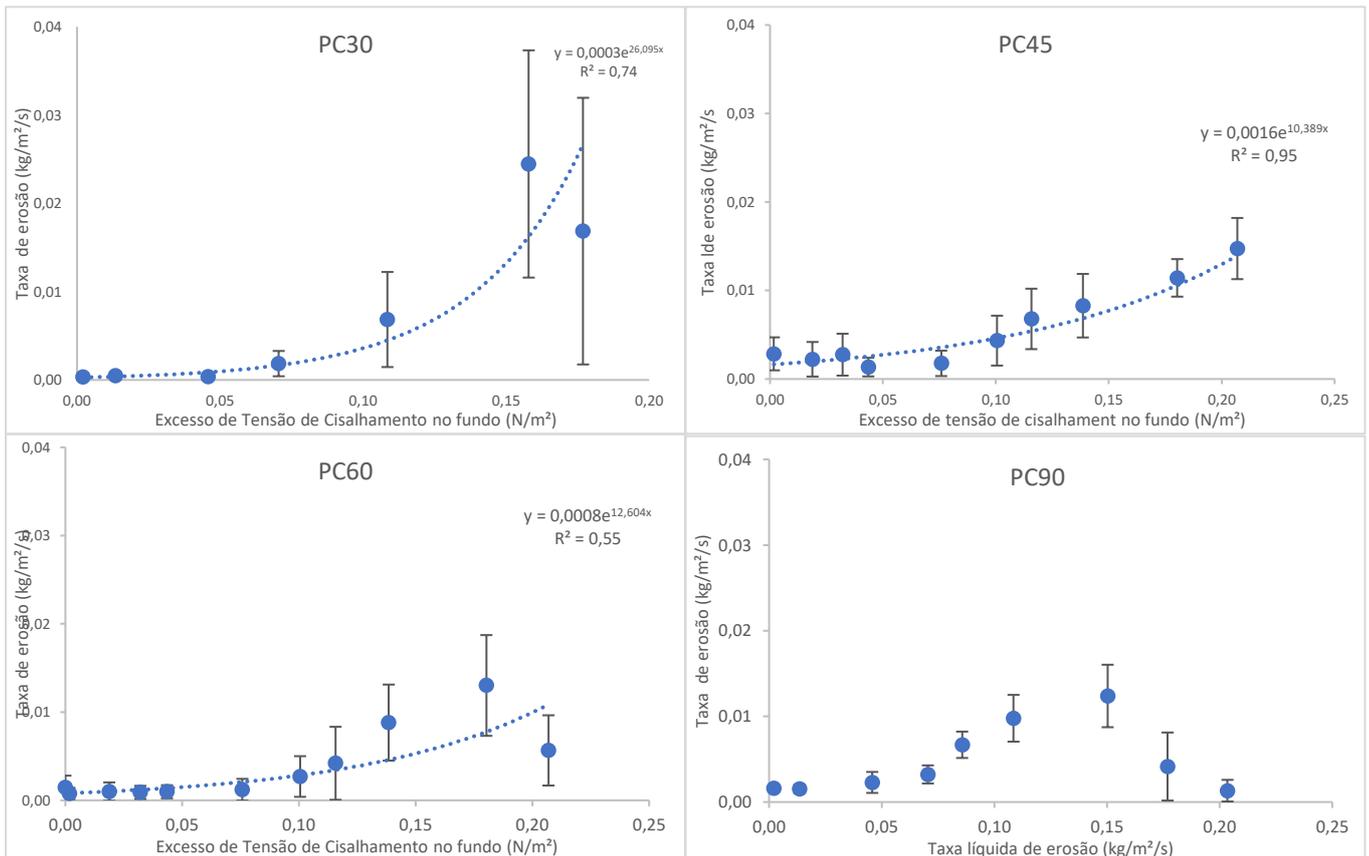


Figura 22: Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo das amostras PC com 30 a 90% areia.

Para a amostra PC30, a média da taxa líquida de erosão foi de $1,7 \times 10^{-3}$ kg/m²/s. Pode ser observado duas fases de erosão (Fig. 23), entre 0,36 a 0,47 N/m² e acima de 0,47 N/m². A primeira apresentou menores valores nas taxas de erosão, sendo que o maior valor registrado foi de $1,8 \times 10^{-2}$ kg/m²/s. Para a segunda fase foi observado um aumento nas taxas de erosão, com o valor máximo registrado de $2,4 \times 10^{-1}$ kg/m²/s (Fig. 23).

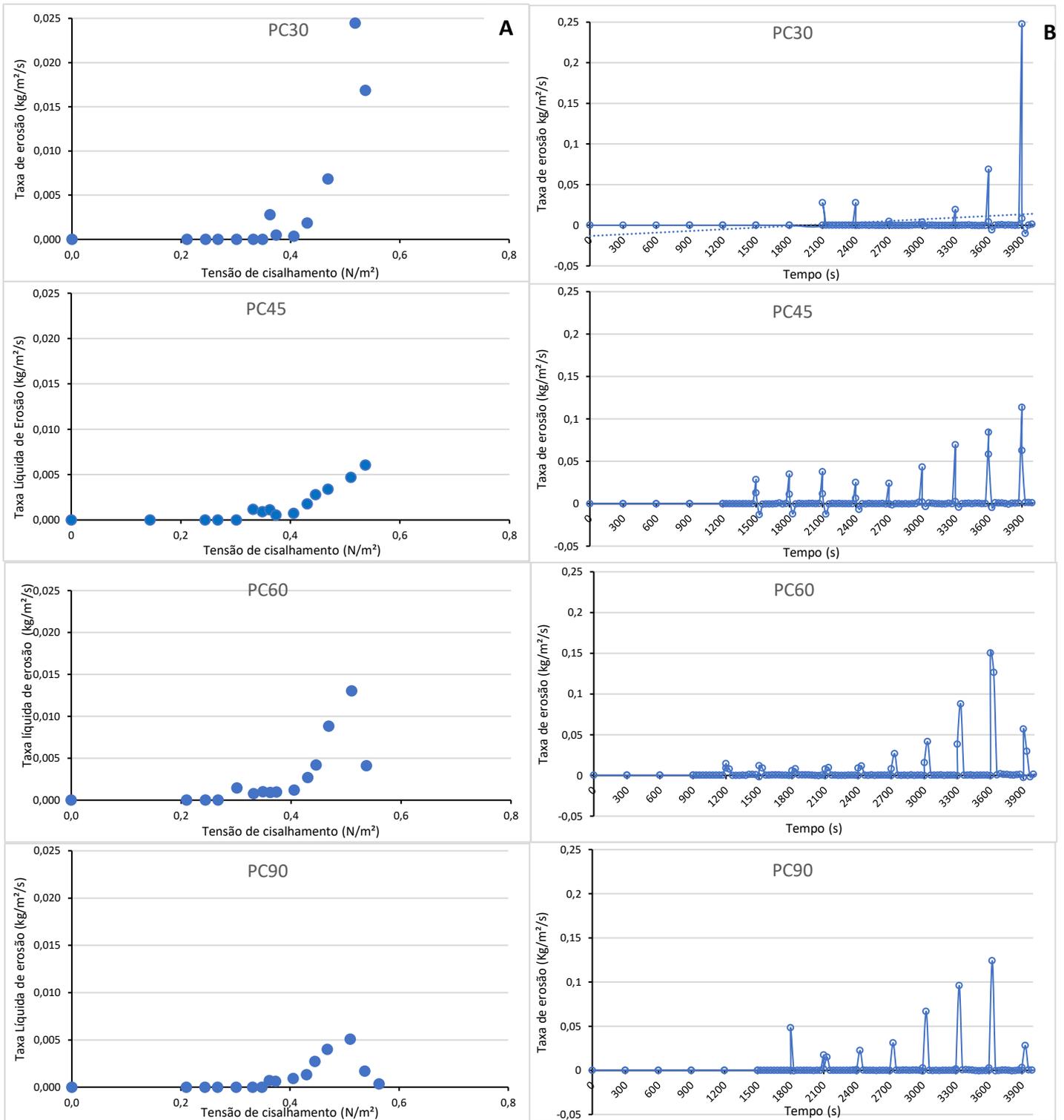


Figura 23: (A) Taxa Líquida de erosão versus tensão de cisalhamento de fundo dos testes de erodibilidade. (B) Taxa de erosão versus tempo decorrido do experimento utilizando a amostra PC com porcentagens de 30 a 90% de areia.

A média nas taxas líquidas de erosão da amostra PC45 foi de $1,4 \times 10^{-3}$ kg/m²/s. As taxas de erosão também podem ser divididas em duas fases. A primeira ocorreu após 25 minutos do início do experimento, em tensões de

cisalhamento entre 0,33 a 0,45N/m², essa fase da erosão foi marcada por menores taxas de erosão, com o valor máximo medido de $6,7 \times 10^{-2}$ kg/m²/s. Para tensões de cisalhamento acima de 0,47N/m², as taxas de erosão aumentaram, atingindo $1,4 \times 10^{-1}$ kg/m²/s.

O experimento realizado com a amostra PC60 teve média de $1,2 \times 10^{-3}$ kg/m²/s nas taxas líquidas de erosão. Diferente do padrão observado nos experimentos anteriores, pode-se observar 3 fases na variação nos valores das taxas de erosão: 1ª) tensões de cisalhamento entre 0,30 a 0,43 N/m²; 2ª) tensões de cisalhamento entre 0,47 N/m² e 0,51 N/m²; 3ª) tensões de cisalhamento acima de 0,51 N/m². A primeira apresentou menores taxas de erosão. A segunda apresentou um aumento nas taxas de erosão e atingiu valores de $1,3 \times 10^{-1}$ kg/m²/s nas taxas de erosão. Na terceira fase foi observada uma queda nos valores das taxas de erosão, apesar do aumento da tensão de cisalhamento no fundo.

Para PC90, a média nas taxas líquidas de erosão foi de $1,17 \times 10^{-3}$ kg/m²/s. As taxas de erosão apresentaram o mesmo padrão da amostra PC60, onde as taxas de erosão apresentaram maiores variações em seus valores (desvio padrão de $5,19 \times 10^{-4}$ kg/m²/s), em tensões de cisalhamento no fundo de 0,36 a 0,45 N/m². Após 20 minutos, foi observado um incremento das taxas de erosão até a tensão de cisalhamento de 0,54 N/m², com valor máximo registrado de $1,2 \times 10^{-1}$ kg/m²/s. Após 60 minutos, as taxas de erosão voltaram a diminuir.

Amostra PCL

Para os experimentos utilizando a amostra PCL com diferentes porcentagens de areia, os testes de erosão (Fig. 24) revelaram que a tensão crítica de cisalhamento variou entre 0,29 e 0,37 N/m² (85 a 120 RPM). De maneira geral, a tensão crítica de cisalhamento tendeu a aumentar quando as porcentagens de areia eram de 15 e 30%, os valores reduziram para as porcentagens de 45 e 60%, voltando a aumentar para o teor de 90%.

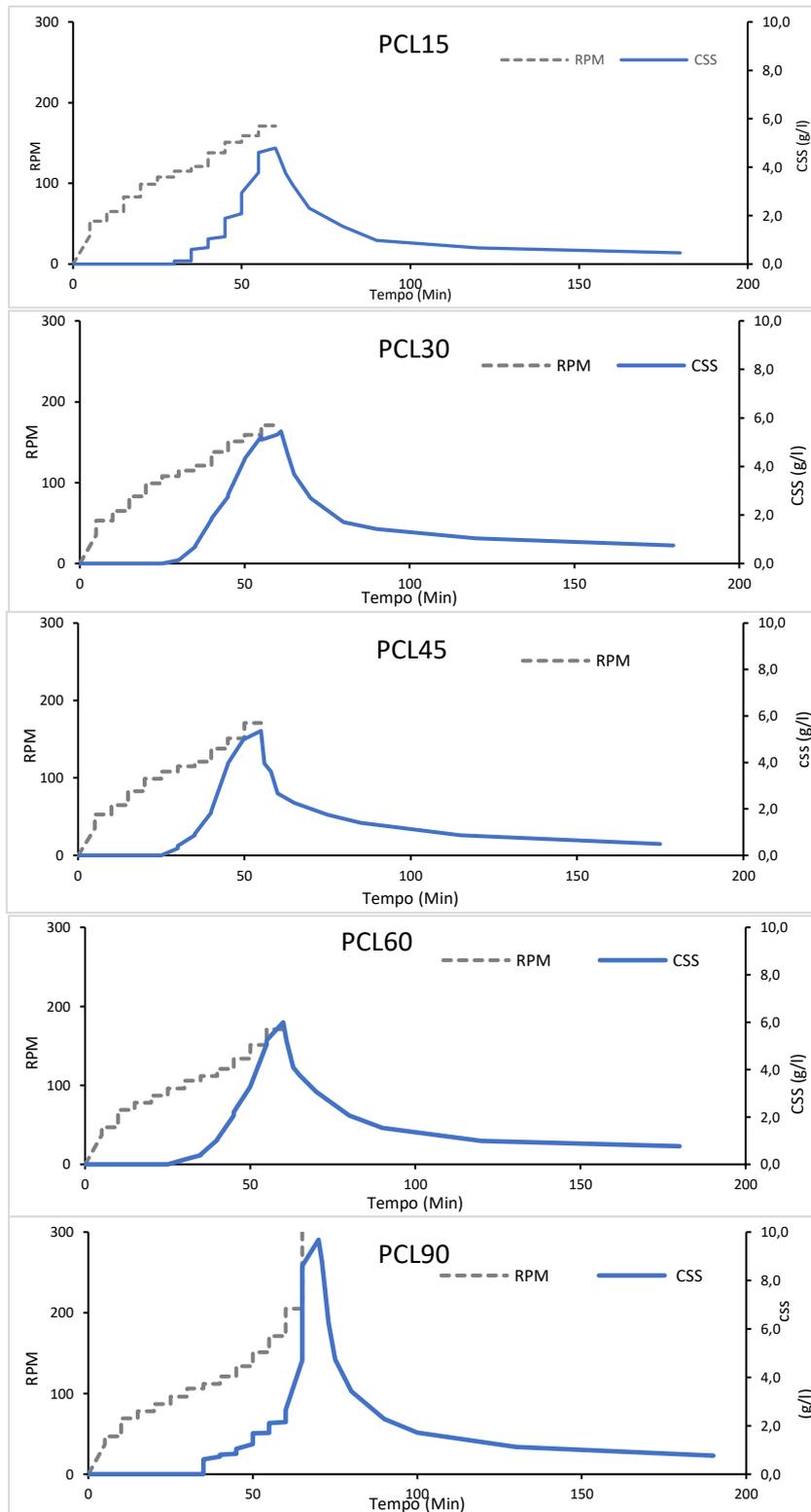


Figura 24: Série temporal de medições dos testes de erodibilidade utilizando a amostra PCL com porcentagens de 15 a 90% de areia.

A erosão da amostra PCL15 teve início 35 minutos após iniciar o experimento. Nesse momento as rotações da hélice eram de 120 RPM (equivalente a $0,37 \pm 0,01 \text{ N/m}^2$). O início do experimento foi marcado por uma média da CSS de $0,3 \pm 0,07 \text{ g/L}$. Esse teste ocorreu até tensões de cisalhamento de $0,47 \text{ N/m}^2$ (170 RPM), com uma média da CSS de $4,8 \pm 0,03 \text{ g/L}$ nessa etapa do experimento.

A tensão crítica de cisalhamento das amostras PCL30 e PCL45 foi de $0,35 \pm 0,01 \text{ N/m}^2$. A erosão de ambas as amostras teve início entre 30 e 35 minutos após iniciar os experimentos, com rotações da hélice entre 105 e 115 RPM. A média da CSS inicial foi de $0,4 \pm 0,05 \text{ g/L}$ e de $0,3 \pm 0,07 \text{ g/L}$ para 30 e 45%, respectivamente. Após 55 minutos, os testes de erodibilidade foram finalizados. Nessa etapa as rotações da hélice eram de 170 RPM, correspondendo a $0,47 \text{ N/m}^2$ de tensão de cisalhamento no fundo, com média da CSS de $5,3 \text{ g/L}$.

A amostra PCL60 apresentou o menor valor de tensão crítica de cisalhamento para os experimentos utilizando a amostra PCL. A erosão teve início entre 25 a 30 minutos após o início do experimento, com rotações da hélice de 85 a 95 RPM (equivalente a $0,32 \pm 0,02 \text{ N/m}^2$ de tensão de cisalhamento). A média da CSS inicial foi de $0,2 \pm 0,08 \text{ g/L}$. Já a média da CSS final foi de $5,9 \text{ g/L}$, em rotações da hélice de 170 RPM.

A erosão da amostra PCL90 teve início em 115 RPM (equivalente a $0,36 \text{ N/m}^2$ de tensão de cisalhamento no fundo), 35 minutos após iniciar o experimento. Nessa etapa a média da CSS no interior do equipamento era de $0,5 \pm 0,09 \text{ g/L}$. Esse experimento ocorreu até a rotação da hélice atingir 308 RPM (equivalente a $0,73 \text{ N/m}^2$ de tensão de cisalhamento no fundo), com uma a média da CSS final de $9,0 \pm 0,95 \text{ g/L}$.

Em relação as taxas de erosão para as amostras PCL, os testes com 15% de teor de areia apresentaram as menores taxas de erosão, seguidos pelos testes com 90%. À medida que a CSS aumentava, as taxas de erosão tiveram diminuições em seus valores. Dessa forma, para essa série de experimentos, foi observado maior grau de dispersão nos valores das taxas de erosão (Fig. 25) em relação aos experimentos anteriores. Assim, para essa série de

experimentos, as taxas de erosão têm sua variabilidade menos explicada pelo excesso da tensão de cisalhamento.

Figura 25: Taxa de erosão em relação ao excesso de tensão de cisalhamento no fundo das amostras PCL com 15 a 90% de areia.

Para a amostra PCL15, a média da taxa líquida de erosão foi de $4,0 \times 10^{-4}$ kg/m²/s, a qual foi a menor taxa registrada em relação a todos os experimentos realizados. Em tensões de cisalhamento entre 0,36 e 0,43 N/m², as taxas de erosão se mantiveram baixas. Após 15 minutos, as taxas de erosão começaram a subir, atingindo o valor máximo de $6,8 \times 10^{-2}$ kg/m²/s (Fig. 26).

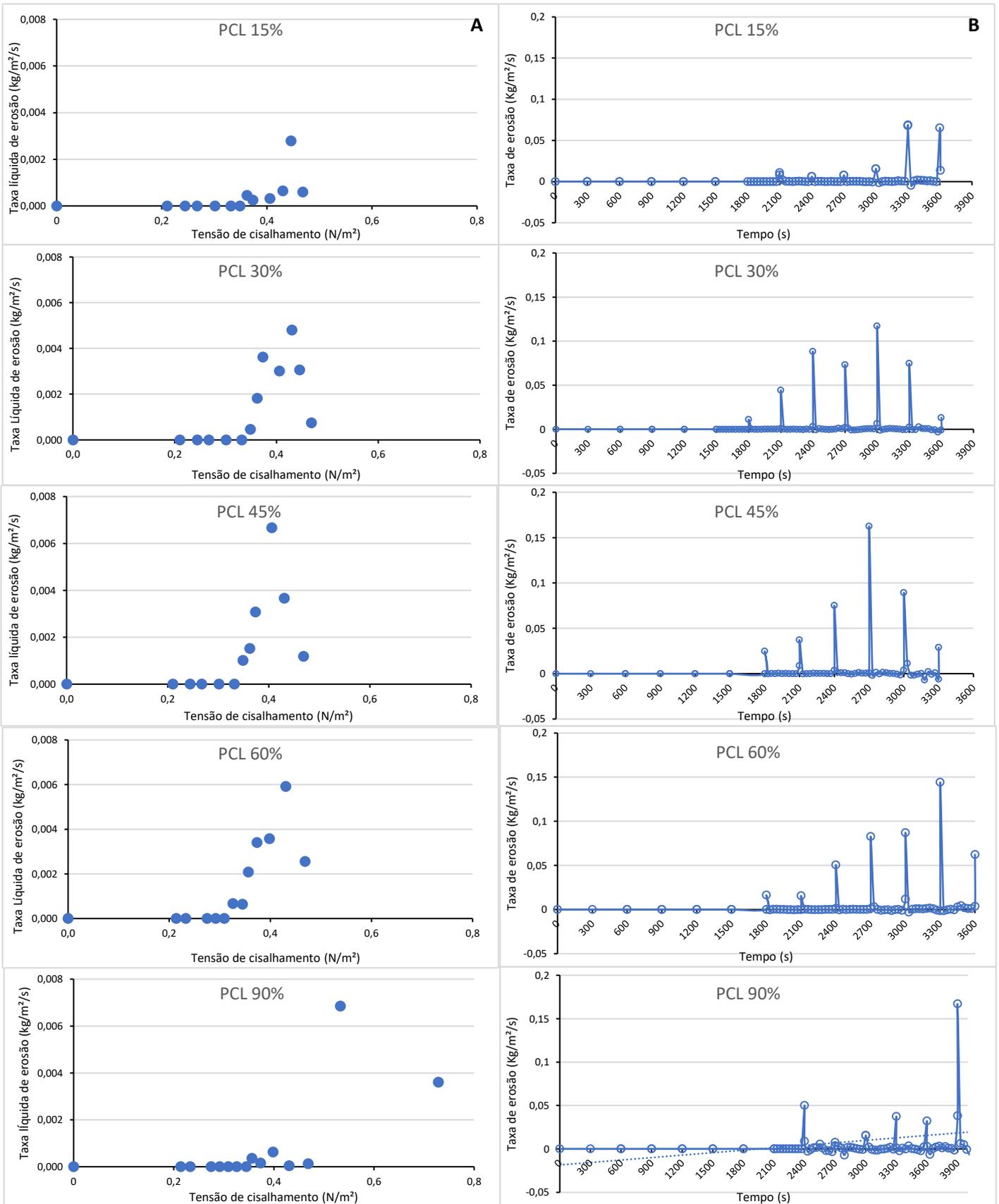


Figura 26: (A) Taxa Líquida de erosão versus tensão de cisalhamento de fundo dos testes de erodibilidade; (B) Taxa de erosão versus tempo decorrido do experimento utilizando a amostra PCL com porcentagens de 15 a 30% de areia.

A amostra PCL30, apresentou média de $1,4 \times 10^{-3}$ kg/m²/s das taxas líquidas de erosão. As taxas de erosão apresentaram maiores variações, não sendo observado um padrão regular de aumento nas taxas. O maior valor registrado de taxa de erosão para essa amostra foi de $1,1 \times 10^{-1}$ kg/m²/s, quando a tensão de cisalhamento no fundo era de 0,43 N/m².

A média das taxas líquidas de erosão da amostra PCL45 foi de $1,5 \times 10^{-3}$ kg/m²/s. As taxas de erosão apresentaram crescimento até a tensão de cisalhamento no fundo de 0,41 N/m². A partir dessa tensão de cisalhamento, as taxas de erosão diminuíram à medida que a tensão de cisalhamento era acrescida.

PCL60 teve média de $1,5 \times 10^{-3}$ kg/m²/s nas taxas líquidas de erosão. Como pode ser isto na Figura 23, foi observado o mesmo padrão da amostra PC45: taxas de erosão aumentaram até a tensão de cisalhamento de 0,43 N/m², maior valor registrado de $1,4 \times 10^{-1}$ kg/m²/s, e subsequente redução dos valores das taxas de erosão.

A amostra PCL90 apresentou média de $8,4 \times 10^{-4}$ nas taxas líquidas de erosão. Diferente do que foi observado nas amostras anteriores, as taxas de erosão apresentaram maiores variações. Em tensões de cisalhamento de 0,36 a 0,47 N/m². Quando a tensão de cisalhamento era de 0,51 N/m², as taxas de erosão aumentaram e foi registrado o maior valor para esse experimento de $1,6 \times 10^{-1}$ kg/m²/s. Após essa tensão de cisalhamento, as taxas voltaram a diminuir.

A partir da comparação de todos os experimentos realizados (Fig. 27), observa-se que a maior média registrada da tensão crítica de cisalhamento foi ($0,44 \pm 0,01 \text{ N/m}^2$) da amostra PCL, enquanto que a menor média ($0,31 \pm 0,02 \text{ N/m}^2$) foi da amostra AR.

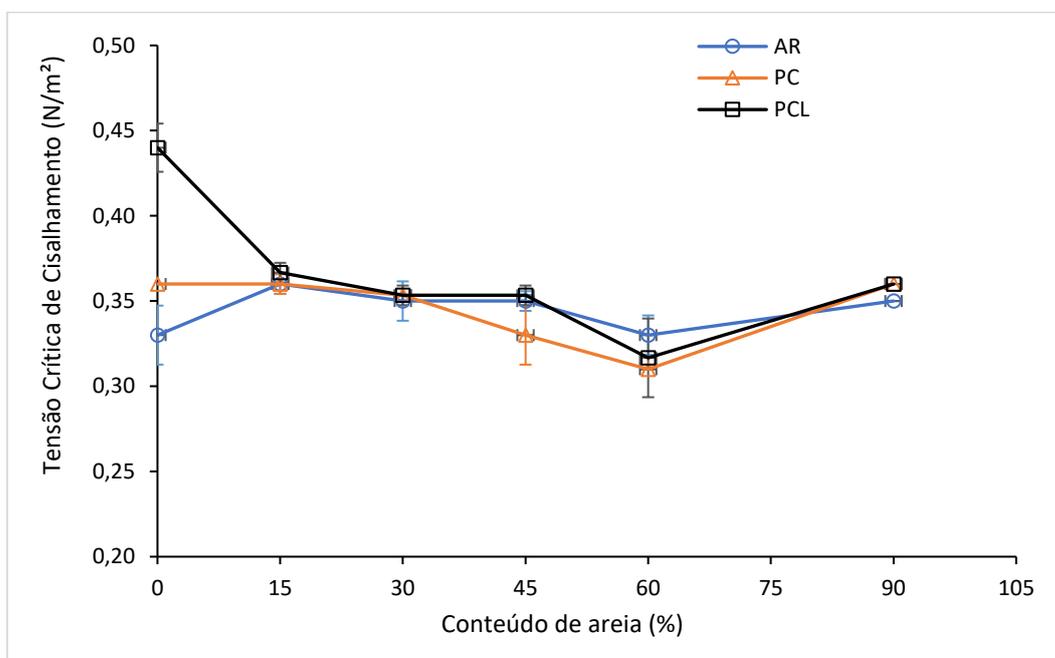


Figura 27: Tensão de cisalhamento crítica plotada contra o conteúdo de areia das amostras AR, PC e PCL.

Apesar da diferença entre os valores de tensão crítica de cisalhamento das amostras PCL e AR, quando 15% de areia foi adicionada nessas duas amostras, essa diferença tendeu a diminuir. Assim, pode-se observar que os valores de tensão crítica de cisalhamento para todos os fundos testados se aproximaram. Também se observa que as maiores diferenças na tensão crítica de cisalhamento observada para as amostras testadas ocorreram entre as amostras sem adição de areia.

As amostras com 15 e 30% de areia apresentaram maiores valores de tensão crítica de cisalhamento quando comparada com as amostras com 45 e 60%, principalmente para as amostras PC e PCL. Em todos os testes realizados a tensão crítica de cisalhamento tendeu a diminuir quando conteúdo de areia acima de 45%. Os valores de tensão crítica de cisalhamento voltaram a aumentar em todos os fundos testados para a porcentagem de 90%.

Para os três tipos de amostras testadas, as taxas de erosão reduziram conforme as concentrações de areia aumentavam (Fig. 28). As maiores taxas de erosão foram para amostras AR enquanto que os menores valores foram para as amostras PCL, exceto para os conteúdos de areia de 45 e 60%, na qual a amostra PC apresentou as menores taxas de erosão. A amostra AR30% foi a que apresentou a maior média das taxas de erosão, em contrapartida o menor valor registrado foi para a amostra PCL15%.

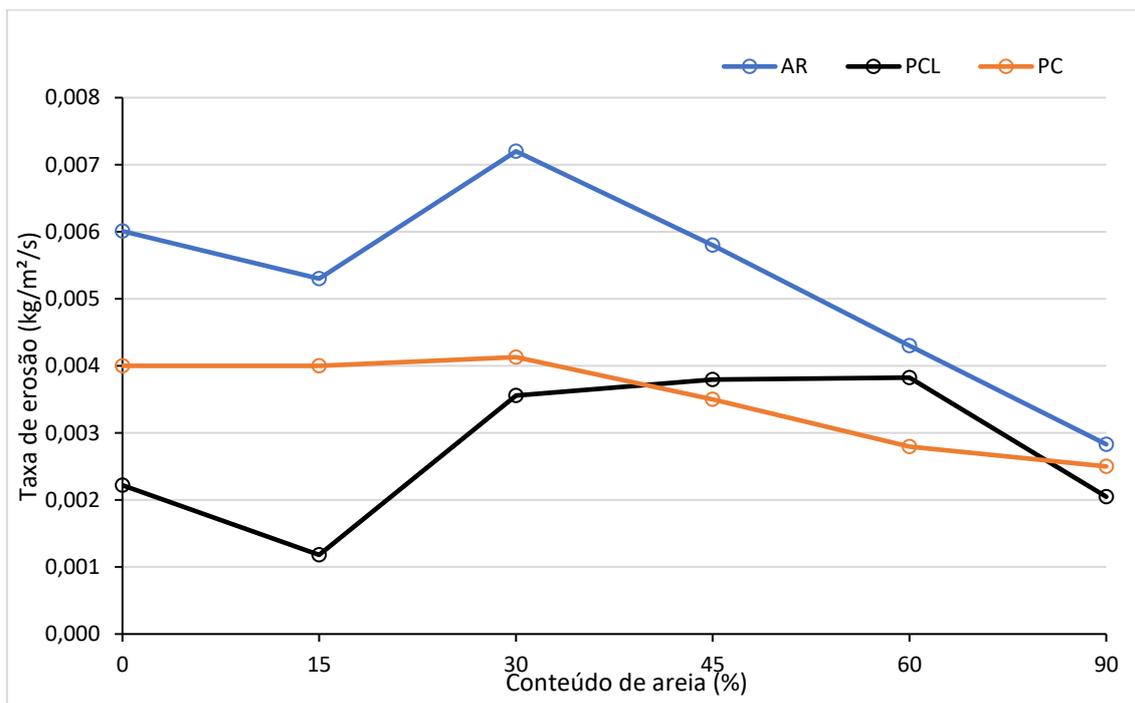


Figura 28: Gráfico da taxa média de erosão em relação à porcentagem de areia para amostras AR, PC e PCL.

Apesar de haver uma redução nas taxas de erosão quando o conteúdo de areia era de 15%, à medida que o conteúdo de areia era de 30% os valores médios nas taxas de erosão dos experimentos aumentaram. No entanto voltaram a reduzir quando o conteúdo de areia dessas amostras era maior que 45%. Além disso, a diferença nos valores médios das taxas de erosão entre as amostras AR, PC e PCL diminuíram para conteúdo de areia maiores que 45%.

3.5 Curvas de Decantação dos sedimentos

Curvas de concentração de sedimento em suspensão foram obtidas para interpretar como as porcentagens de areia influenciaram na decantação das amostras ao longo do tempo. Os gráficos apresentados estão limitados a 30

minutos de duração dos experimentos para melhor visualização das curvas de decantação, pois foi durante esse tempo que ocorreram as maiores variações de CSS.

Para as amostras AR (Fig. 29), a maior diminuição de CSS foi durante os primeiros 5 minutos de decantação. A maior declividade na curva de CSS observada foi da amostra AR90. Portanto foi a que apresentou o processo de decantação mais rápido, com valores de 11,5 g/L no início da decantação, chegando a 2,4 g/L após 5 minutos de decantação. Já as amostras AR45 e AR60, apresentaram uma diminuição de aproximadamente 7 g/L em relação à CSS inicial para esse mesmo tempo, de forma que os valores da CSS no início do processo de decantação eram de 11,7 g/L para AR45 e 12,3 g/L para a AR60 e após 5 minutos de decantação essas concentrações eram de 4,0 g/L e 4,8 g/L para AR45 e AR60, respectivamente.

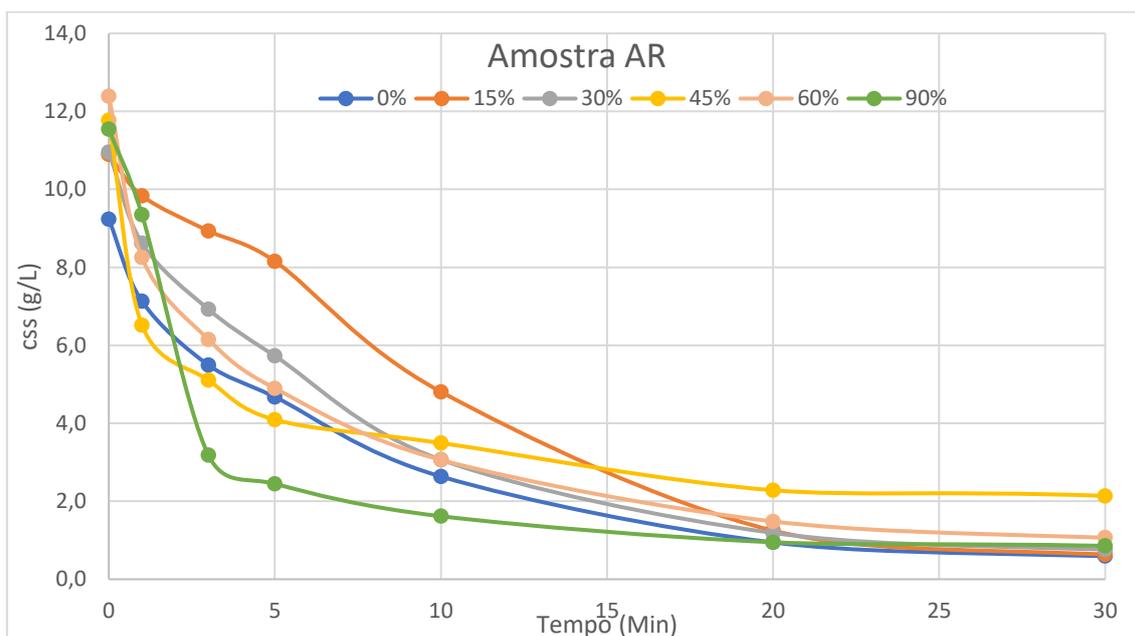


Figura 29: Curvas de decantação de sedimentos em suspensão dos experimentos da amostra AR com diferentes percentuais de areia em sua composição. Os gráficos são apresentados para 30 min de experimento. O gráfico completo das curvas de decantação está apresentado no Apêndice B.

A curva que apresentou a menor declividade foi AR15, dessa forma foi a que exibiu o processo de decantação mais lento. A CSS no início da decantação era de 10,8 g/L e após 5 minutos, esse valor diminuiu para 8,1 g/L. Já as amostras sem adição de areia (AR) e com 30% de areia (AR30) apresentaram uma diminuição dos valores de CSS durante os primeiros 5 minutos de decantação (4,5 g/L e 5,2 g/L para AR e AR30, respectivamente).

As curvas de CSS durante o processo de decantação da amostra PC são apresentadas na Figura 30. As maiores declividades das curvas ocorreram nas amostras PC60, PC90 e PC45. Os valores de CSS durante o início do processo de decantação da amostra com 45% de areia foi 7,5 g/L e após 5 minutos, esse valor era 3,0 g/L. Para a amostra com 60%, a CSS no tempo zero era 8,6 g/L e após 5 minutos, 3,5 g/L. Enquanto para a amostra com 90%, a CSS no início da decantação era 7,5 g/L e após 5 minutos, 3,0 g/L.

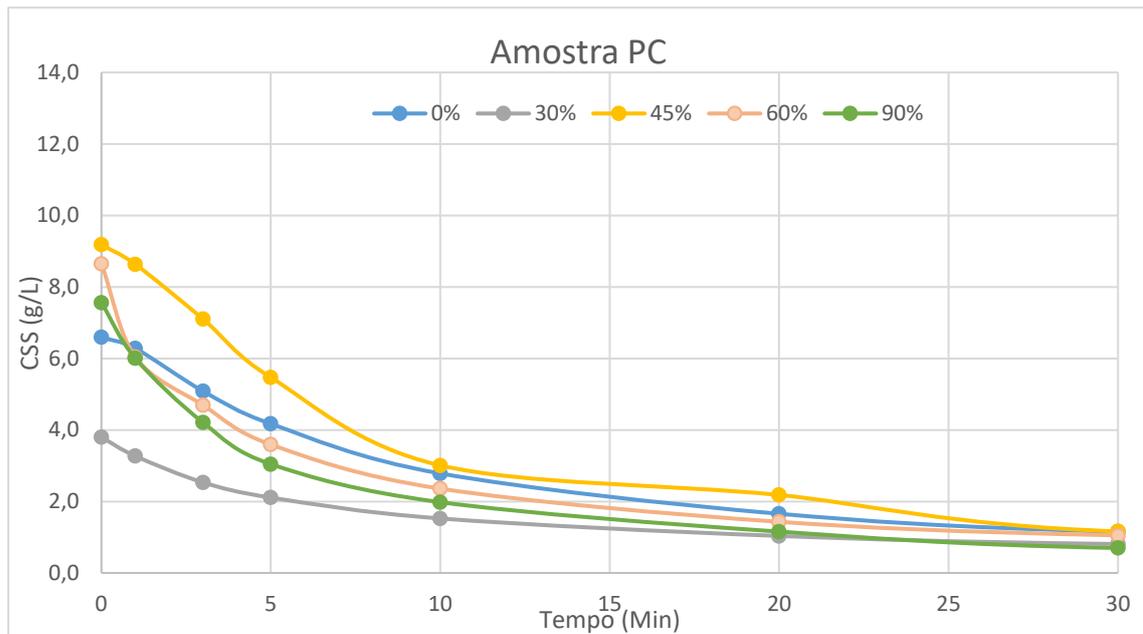


Figura 30: Curvas de decantação de sedimentos em suspensão dos experimentos da amostra PC com diferentes percentuais de areia em sua composição. Os gráficos são apresentados para 30 min de experimento. O gráfico completo das curvas decantação está apresentado no Apêndice B.

As curvas de decantação com menor declividade para o período avaliado foram as das amostras PC e PC30, nas quais as diminuições das CSS no início da decantação e após 5 minutos foi de 2,4 g/L para a amostra sem adição de areia e 1,7 g/L para amostra com 30% de areia.

As curvas de CSS durante o período de decantação para a amostra PCL são apresentadas na Figura 31. As maiores declividades das curvas de decantação foram para as amostras PCL90, PCL60 e PCL45, em ordem decrescente de declividade. A CSS no início do processo de decantação era de 9,6 g/L e após 5 minutos, a CSS chegou a 4,7 g/L para PCL90. Portanto, essa amostra apresentou o processo de decantação mais acelerado. Para PCL60 e PCL45, os valores de CSS no início da decantação foi de 6,0 g/L e 5,4 g/L, respectivamente; após 5 minutos os valores registrados foram de 3,7 g/L e 2,6 g/L, respectivamente.

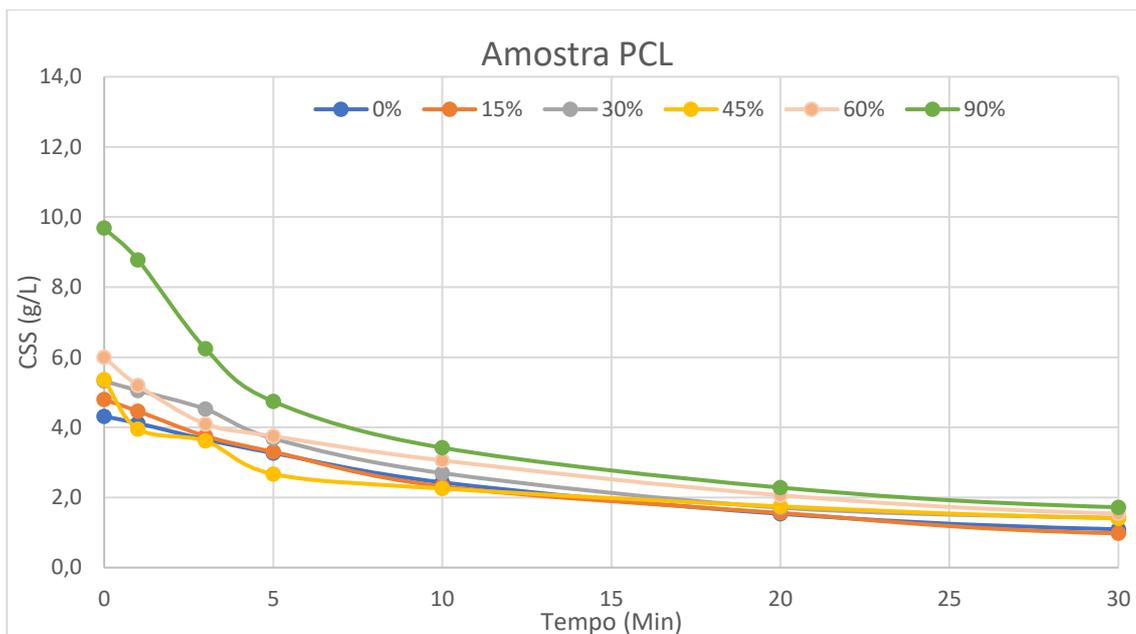


Figura 31: Curvas de decantação de sedimentos em suspensão dos experimentos da amostra PCL com diferentes percentuais de areia em sua composição. Os gráficos são apresentados para 30 min de experimento. O gráfico completo das curvas de decantação está apresentado no Apêndice B.

A amostra PCL30 apresentou a curva de decantação intermediária, com valores de 5,3 g/L no início da decantação e 3,6 g/L após 5 minutos. As curvas de decantação com menor declive foram das amostras PCL e PCL15, nas quais apresentaram valores de 4,3 g/L e 4,7 g/L de CSS no início do processo de decantação, respectivamente; após 5 minutos esses valores eram de 3,2 g/L para a amostra sem adição de areia e 3,3 g/L para a amostra com 15% de areia.

4. DISCUSSÃO

Com base nos resultados, pode ser observado que a presença da fração arenosa na suspensão inicial tem um grande impacto nos processos de formação do leito (Barry et al., 2006; Jacobs et al., 2011; Grasso et al., 2015; Dufois et al., 2015; Perkey et al., 2020). A presença de areia em um fundo de lama tende a tornar esse fundo mais denso e acelerar sua consolidação. Grasso et al. (2014) analisaram um conjunto de dados de experimentos de coluna de sedimentação com concentrações iniciais e teores de areia variados, como observado em trabalhos anteriores (por exemplo, Torfs et al. 1996), os autores confirmaram que para uma dada concentração de massa inicial, a consolidação foi mais rápida para amostras com maiores teores de areia. O mesmo aponta os resultados dos testes de consolidação realizados nesse estudo, na qual as amostras com maiores porcentagens de areia necessitaram de menores tempos de consolidação para formarem um fundo consolidado. A passagem dos grãos de areia pela lama que ainda não está consolidada, deixa espaços que podem facilitar a drenagem, o que tende a compactar o fundo (Waeles, 2005). Pode – se pensar que esse efeito drenante é especialmente válido para a camada de lama localizada sob uma camada de areia, uma vez que a consolidação está associada a um movimento ascendente da água nos poros (Migniot, 1989). Por outro lado, a presença de uma camada arenosa, cujo peso específico é maior do que uma camada de lama da mesma espessura, impõe uma tensão maior no fundo e, portanto, também acelera sua consolidação (Torfs et al., 1996).

Também foi observado o efeito acelerador dos sedimentos arenosos na decantação do sedimento coesivo. Ao comparar as curvas de decantação das amostras sem e com adição de areias finas observou-se que, as amostras com maiores percentuais de areia apresentaram uma declividade mais acentuada do que aquelas sem ou com menores percentuais de areia, apontando para um processo de decantação mais acelerado das amostras com maiores percentuais de areia. Acredita-se, que as características de decantação dificultadas nas suspensões de areia e lama determinam em grande parte a estrutura vertical dentro dos depósitos de leito resultantes, por exemplo, a formação de camadas de depósito misturadas ou segregadas, resultando em uma evolução da

resistência no leito de lama contra a erosão (Migniot, 1989; Waeles, 2005; Te Slaa et al., 2013; Cuthbertson et al., 2016).

Os resultados dos testes de erodibilidade das amostras sem adição areia indicaram que a amostra AR apresenta características de um fundo mais erodível, com baixa tensão crítica de cisalhamento e altas taxas de erosão comparado aos outros dois tipos de fundo (PC e PCL). Os baixos valores de tensão crítica de cisalhamento encontrados para a amostra AR pode ser relacionada à mineralogia da argila, na qual 46% de sua composição foi constituída pelo mineral caulinita, a qual apresenta baixa coesão. Alguns estudos apontam que a tensão crítica de cisalhamento pode ser correlacionada positivamente com a capacidade de troca catiônica dos minerais argilosos (Gerbersdorf et al., 2007). A caulinita é caracterizada por ter partículas menores e a menor capacidade de troca catiônica, e dentre os minerais argilosos, são os menos eletroquimicamente ativos (Grim, 1962; Grabowski et al., 2011). Além disso, a pequena porcentagem de matéria orgânica presente na amostra tem grande influência nesse resultado, uma vez que foi utilizada argila industrial para realização dos experimentos. É sabido que o material orgânico tem um papel estabilizador do fundo, já que as moléculas orgânicas podem se ligar diretamente aos grãos do sedimento, e que os mesmos apresentam propriedades coesivas e adesivas semelhantes aos componentes inorgânicos (Gillott, 1987; Brady e Weil, 2002; Winterwerp e van Kesteren, 2004).

Por outro lado, a amostra PCL apresentou menor erodibilidade, dado que exibiu os maiores valores de tensão crítica de cisalhamento e menores taxas de erosão. Apesar da amostra PCL também apresentar a maior parte da sua composição mineralógica constituída pela caulinita, essa amostra apresentou um alto teor de matéria orgânica (22%). Em um estudo realizado em laboratório por Ravisangar et al. (2005), a matéria orgânica dissolvida mostrou aumentar a estabilidade dos leitos de caulinita depositados. Alguns estudos *in situ* também suportam o papel estabilizador do conteúdo orgânico em sedimentos coesivos, onde uma correlação positiva entre conteúdo orgânico e tensão crítica de cisalhamento também foi relatada por Aberle et al. (2004) e Gerbersdorf et al. (2007).

Apesar da maior resistência da amostra PCL à erosão, sua curva de CSS apresentou crescimento suave, e após a tensão de cisalhamento induzida pelo fluxo exceder a tensão crítica de cisalhamento, todo material foi rapidamente erodido, o que evidencia maior resistência à erosão apenas na superfície desse fundo. Em oposição, apesar da menor erodibilidade, a curva da amostra PC apresentou crescimento mais escalonado, apontando diferença na resistência do material a erodir ao longo da profundidade do pacote de fundo à medida que a tensão de cisalhamento no fundo era aumentada. Quando foram adicionados 15% de areia na amostra PCL (PCL15), a curva de CSS também passou a apresentar um padrão mais escalonado, diferente do que foi observado para a amostra sem adição de areia. Dessa forma, as porcentagens de areia e as curvas CSS das amostras PC e PCL se tornaram mais similares, evidenciando que a presença de grãos de areia no interior da lama muda o padrão no qual o fundo é erodido (Mitchener e Torfs, 1996).

Uma característica importante observada nos experimentos é a segregação areia/lama (Fig. 32). As amostras testadas foram depositadas a partir de uma suspensão, dessa forma, a estrutura do fundo formado foi de camadas devido à decantação diferencial e separação da areia e da lama (Mitchener e Torfs, 1996; Van Rijn, 2020). Os leitos em camadas segregadas, como foi visto, geralmente ocorrem devido aos efeitos diferenciados de decantação entre as frações de areia e lama nas misturas. Na figura pode ser observar que as partículas de areia, maiores e mais densas, se depositaram mais rapidamente do que flocos de argila, menores e menos densos, resultando em um depósito com uma camada de lama sobrejacente a uma camada de fundo dominada por areia (Williamson, 1991; Torfs, et al., 1996; Waeles et al., 2005; Te Slaa et al., 2013). Cada camada pode ter uma estrutura diferente, densidade aparente (grau de consolidação) e resistência contra a erosão, resultando em um comportamento de erosão gradual (Mitchener e Torfs, 1996; Cuthbertson et al., 2016), o que pode explicar as diferenças nas taxas de erosão ao longo da profundidade encontradas nos experimentos com adição de areia.

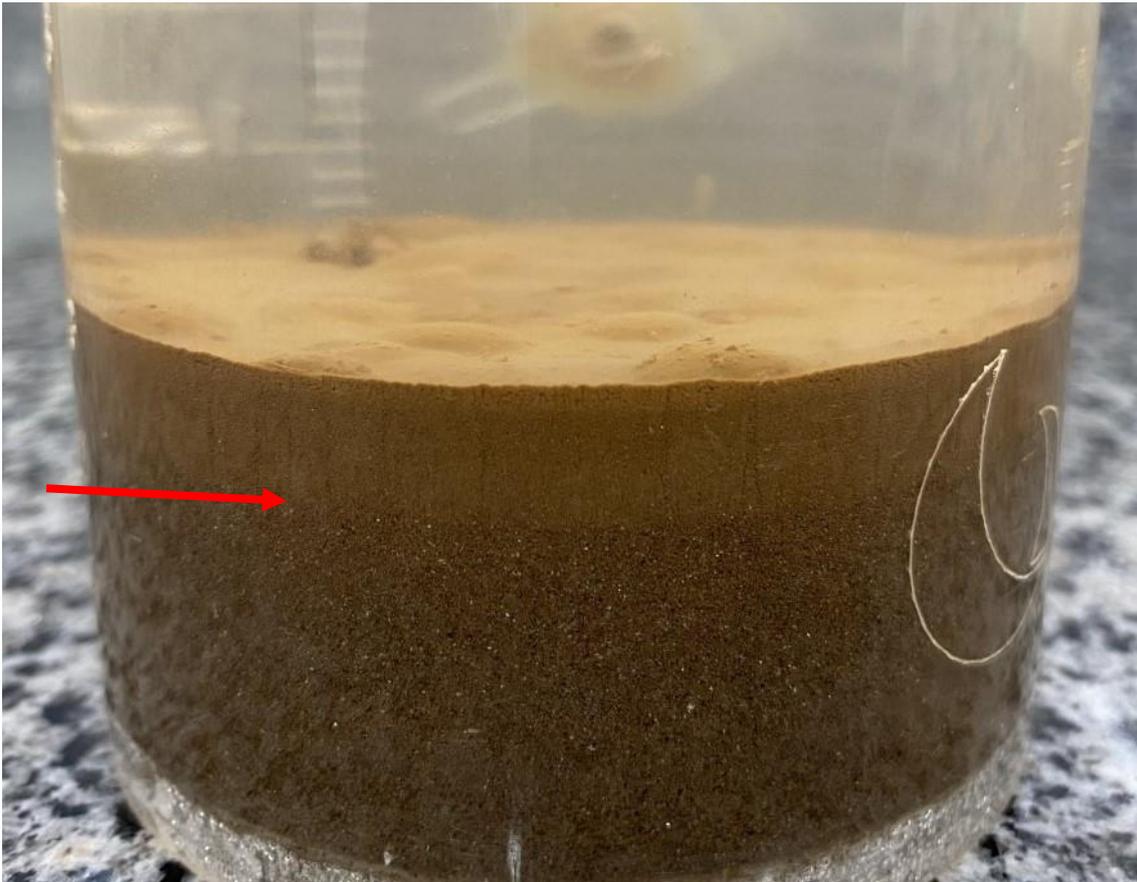


Figura 32: Exemplo de uma amostra testada nesse estudo (PC60). Observe a estrutura em camadas segregadas de areia e lama. A seta indica o contanto entre as duas camadas.

A série de experimentos realizados com o CATER com amostras com diferentes porcentagens de areia, houve uma diferença na tensão crítica de cisalhamento e nas taxas de erosão entre as amostras testadas. No estudo atual, todos os experimentos realizados com a mesma amostra, porém com porcentagens diferentes de areia, foram padronizados quanto à temperatura, salinidade, turbulência e densidade. Dessa forma, as diferenças no processo de erosão tornam-se dependentes da granulometria do sedimento.

Em estudos anteriores (Torfs et al., 2000; Barry et al., 2006; Le Hir et al., 2008), foi constatada uma redução da tensão crítica de cisalhamento associada ao aumento do teor de areia. Essa tendência também foi observada nas amostras testadas neste estudo. Conforme o conteúdo de areia se aproximou de 45 e 60%, ocorreu uma redução na tensão crítica. Quando o conteúdo de lama é baixo, as partículas de areia podem entrar em contato umas com as outras e

as partículas de lama passam a preencher os vazios formados entre os grãos de areia (interstícios), se comportando de forma menos coesiva (Torfs, 1995; Van Ledden et al., 2004 ; Wu et al., 2018). Porém, quando o teor de lama é alto, há partículas de lama suficientes para evitar o contato grão a grão das partículas de areia e, conseqüentemente, as partículas de areia perdem o contato umas com as outras e "flutuam" na matriz de lama (Torfs et al., 2000), o que pode acarretar a maior resistência desse fundo à erosão, pois o fundo torna-se mais compacto e as forças de coesão aumentam.

No entanto, para a maior porcentagem de areia (90%), os valores de tensão crítica de cisalhamento não seguiram o mesmo padrão. Para as amostras com essa porcentagem de areia a tensão crítica de cisalhamento tendeu a aumentar em todas as amostras testadas. Devido à pouca quantidade de lama presente nessas amostras, a matriz sedimentar pode ter de ser tornado menos dependente da coesão da lama e mais dependente das características de um fundo arenoso (Torfs et al., 2000).

Enquanto os resultados mostraram pequenas variações nos valores de tensão crítica de cisalhamento entre as amostras testadas, um impacto maior foi observado nas taxas de erosão desses sedimentos. A tendência foi de diminuição quando o conteúdo de areia chegou a 15% ($1,18 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$), menor média da taxa de erosão observada nos experimentos, corroborando com os maiores valores de tensão crítica de cisalhamento ($0,37 \text{ N/m}^2$) dos experimentos com adição de areia. Sendo observado, portanto a diminuição da taxa de erosão com o aumento da resistência ao cisalhamento (Lee e Mehta, 1994). Por outro lado, o mesmo não ocorreu para as amostras com conteúdo de areia de 45 a 60% com menores valores de tensão crítica de cisalhamento ($0,31 \text{ N/m}^2$) (Fig.27). Nessas amostras ocorreu uma diminuição nas taxas de erosão (Fig. 28). Pode-se observar que o aumento da areia na matriz do sedimento induz a uma erosão antecipada (em relação às menores porcentagens de areia para a mesma tensão de cisalhamento), mas a uma taxa baixa (entre $2,8 \times 10^{-3}$ e $5,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$) (Kamphuis,1990). Os resultados encontrados nessa pesquisa são consistentes com estudos anteriores, mostrando que ocorre uma redução das taxas de erosão com o aumento do teor de areia (Mitchener e Torfs,1996; Roberts et al., 1998; Arbelle, 2004).

Outro resultado importante afetado pela mudança no percentual de areia nas amostras foi a análise do excesso da tensão de cisalhamento de fundo. O excesso de tensão é um indicador da provável quantidade de sedimento que será erodido por uma determinada forçante. Foi observado que o coeficiente de determinação entre a tensão de cisalhamento e as taxas de erosão diminuíram à medida que o percentual de areia da amostra aumentava. Esse resultado mostra que, para amostras com pouco ou nenhuma areia em sua composição, o aumento na taxa em que o material é erodido foi diretamente relacionado com a tensão de cisalhamento do fluxo (Piedra-Cueva e Mory, 2000). Porém, à medida que o percentual de areia aumentou, as taxas de erosão não puderam ser explicadas pelo excesso de tensão de cisalhamento, existindo duas fases de erosão (Fig. 33).

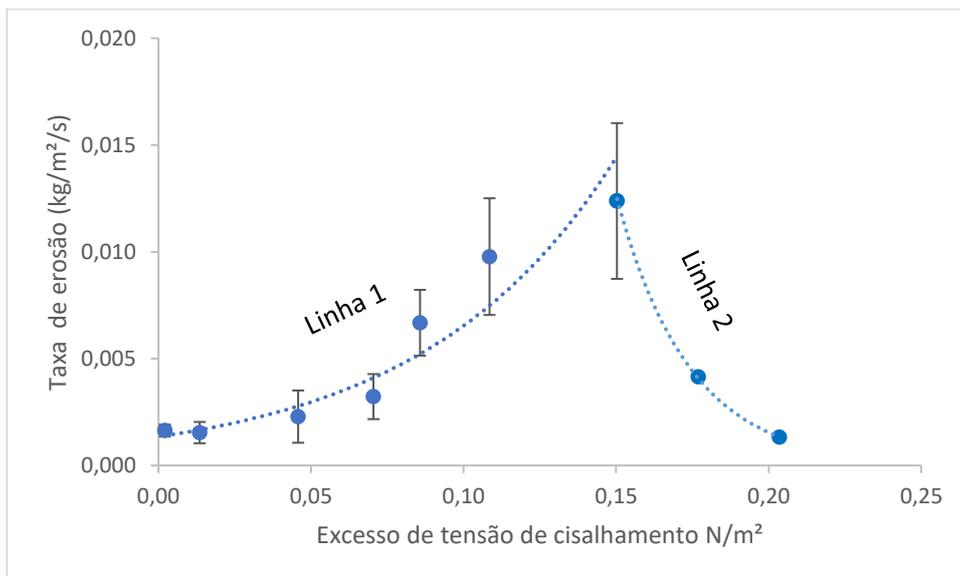


Figura 33: Taxas de erosão versus excesso de tensão de cisalhamento no fundo para amostra PC90, evidenciando as duas linhas de tendência durante as fases de erosão.

A primeira fase, caracterizada pelo aumento exponencial das taxas de erosão com o aumento da tensão de cisalhamento no fundo. Já a segunda fase é caracterizada pela taxa de erosão reduzindo à medida que ocorre um aumento do excesso de tensão de cisalhamento no fundo. Essas diferentes fases representam camadas diferentes formadas no fundo. Arbelle (2004) também assumiu que, para leitos estratificados, existe um gradiente de resistência à erosão do fundo, o qual descreve um decréscimo exponencial das taxas de

erosão. Alguns padrões similares também foram registrados por Mitchner e Torfs (1996), na qual observaram duas fases de erosão: uma primeira com um transporte alto de carga de fundo e uma segunda fase com uma taxa mais baixa; porém ambas para as fases a tendência era de aumento das taxas de erosão com o aumento da tensão de cisalhamento no fundo. Assim como para o presente estudo, essas duas fases também representavam duas camadas diferentes no fundo, com diferentes resistências à erosão. Porém, as reduções nos valores das taxas de erosão para as amostras com maiores percentuais de areia encontradas nesse estudo foram relacionadas, não apenas, à diferença de resistência à erosão das camadas no fundo, mas também à dificuldade da tensão de cisalhamento induzida pela hélice do equipamento em manter em suspensão as partículas de areia após terem sido ressuspensas.

Além da diferença nos coeficientes de determinação entre a tensão de cisalhamento e as taxas de erosão, ainda se observa a diferença nas linhas de crescimento entre as amostras. As amostras PC e PCL apresentaram comportamento exponencial enquanto as amostras AR apresentaram comportamento linear. Isso pode ser mais um indicativo da diferença na resistência desse material à erosão, podendo estar relacionado às propriedades físicas do sedimento, como por exemplo a fração de argila e a densidade (Perera et al., 2020).

4.1 Processo erosivo na plataforma continental adjacente a foz do Rio Doce

A resistência ao cisalhamento de um leito sedimentar coesivo é uma propriedade significativa em estudos de processos erosivos na plataforma, embora esse valor possa ser calculado (Oliveira, 2018), vários fatores precisam ser considerados ao lidar com processos de sedimentos finos. Como foi visto, a erodibilidade é influenciada por um grande número de propriedades do sedimento que interagem de maneira complexa. Ao identificar essas propriedades-chave do sedimento, fornecemos o pano de fundo para uma discussão sobre como a interação entre as diferentes propriedades do pacote sedimentar podem gerar variação nos processos erosionais, e, conseqüentemente, no desenvolvimento de modelos de dinâmica sedimentar para sedimentos coesivos.

Como foi visto anteriormente, propriedades como teor de areia e matéria orgânica afetam a erodibilidade de leitos compostos por sedimentos coesivos, sendo um parâmetro de suma importância a ser avaliado, principalmente em plataformas continentais mistas. A plataforma continental adjacente à Foz do Rio Doce, por sua vez, região na qual os sedimentos testados foram coletados, foi caracterizada como uma plataforma com distribuição sedimentológica heterogênea (Quaresma et al., 2015; Silva 2017; Vieira, 2017), com presença de regiões caracterizadas por sedimentos mais grossos (cascalho, areia grossa e areia média), e com contribuição variada de sedimentos mais finos (areia fina, muito fina e lama) (Fig. 34). Segundo Quaresma et al. (2015), a plataforma interna adjacente à Foz do Rio Doce, pode ser dividida em três setores com base em suas características sedimentológicas: 1) região próxima da foz e ao sul do Rio Doce, que apresenta maior teor de lama, atingindo concentrações de até 90%, com altos teores de argila; 2) a região centro-norte da foz, onde ocorre menor deposição de lama em relação à foz sul, com teores de lama de 40 a 45% menores; 3) região próxima da foz e ao norte, na qual ocorre uma maior variação na distribuição sedimentológica com teores de areia e lama de até 40%.

Fazendo um exercício de cálculo de taxas de transporte sedimentar, para a região da plataforma adjacente à desembocadura do Rio Doce e utilizando os resultados de tensão de cisalhamento desse estudo, foi possível inferir valores de transporte de sedimentos para regiões com diferentes percentuais de areia. Por exemplo, dada uma região com uma densidade média de 1218 kg/m^3 , uma tensão de cisalhamento no fundo de $0,5 \text{ N/m}^2$ produziriam taxas de erosão por unidade de área conforme pode ser visto na tabela 2. Conforme visto nos resultados, ocorre uma redução nos valores das taxas de erosão ao acrescentar areia nas amostras.

Tabela 2: Taxas de erosão para amostras com diferentes porcentagens de areia, considerando uma tensão de cisalhamento no fundo de $0,5 \text{ N/m}^2$ e densidade de $\approx 1218 \text{ kg/m}^3$.

Amostra PC	
Conteúdo de areia (%)	Taxa de erosão ($\text{kg/m}^2/\text{h}$)

0	79,6
15	56,2
30	60,9
45	41,3
60	46,8
90	44,5

Essas informações podem ser muito úteis para o entendimento de como essas áreas respondem a diferentes forçantes físicas e interferências de origem antrópica, podendo ter implicações significativas para o planejamento de projetos de engenharia, e entendimento dos padrões de dispersão de poluentes e nutrientes. Outro ponto que não se pode deixar de se destacar é a importância desses depósitos e do próprio aporte sedimentar do rio na proteção e manutenção da linha de costa e dos habitats marinhos.

5. CONCLUSÃO

Após a realização de experimentos para se determinar a tensão crítica de cisalhamento e taxas de erosão de amostras de sedimentos coesivos naturais e argila industrial com diferentes teores de areia (0 a 90%; total de 17 experimentos com réplicas), chegou-se nas principais conclusões abaixo:

- (1) Os processos de consolidação e decantação das amostras foram acelerados com o aumento do percentual de areia.
- (2) Experimentos utilizando as amostras naturais (PCL e PC) apresentaram menor erodibilidade, ou seja, maior tensão crítica de cisalhamento e menores taxas de erosão, quando comparadas às amostras de argila industrial (AR). Fato que indica que a presença de matéria orgânica também exerce grande influência na resistência do fundo a ser erodido.
- (3) Os resultados dos testes de erodibilidade mostraram que, à medida que a porcentagem de areia do material aumentava, a variabilidade nos dados de erosão entre as amostras testadas diminuía. Esta diminuição na variabilidade pode ser atribuída à menor influência das propriedades coesivas da lama nos valores de tensão crítica de cisalhamento e de taxas de erosão.
- (4) A adição de areia à lama pode acelerar o início da erosão, diminuindo a condição de limiar necessária para o movimento de sedimentos, porém com taxas de erosão mais baixas. A taxa de erosão de um leito misto pode ser reduzida por um fator de 2 quando 15% de areia é adicionada à lama. A redução na taxa de erosão correu em todas as amostras com percentuais de areia acima de 30%.
- (5) Os fundos com teores de areia formados apresentaram camadas estratificadas, com uma camada de lama sobrejacente a uma camada de areia, fazendo com que as variações na estrutura de densidade vertical e composição da mistura também afetassem o modo e os processos de erosão.
- (6) A tendência de aumento das taxas de erosão com o aumento da tensão de cisalhamento no fundo foi observada para amostras com pouco ou

nenhuma areia em sua composição. Para os experimentos realizados com maiores percentuais de areia, um maior grau de dispersão entre o excesso de tensão de cisalhamento no fundo e taxas de erosão foi observado.

- (7) As tendências de crescimento das taxas de erosão em relação à tensão de cisalhamento no fundo apontaram para crescimentos exponenciais e lineares das taxas de erosão. Essa diferença, observada principalmente entre as amostras naturais (PC e PCL) e artificiais (AR), pode indicar diferença na resistência desse material à erosão e requer mais estudos.

Por fim, a visão aprimorada sobre o comportamento e a erosão de sedimentos com característica coesiva permitem uma melhor compreensão das propriedades que influenciam os processos erosivos de sedimentos coesivos naturais.

REFERÊNCIAS

- Aberle, J., Nikora, V., & Walters, R., 2004. Effects of bed material properties on cohesive sediment erosion. *Marine Geology*, 207(1-4), 83-93.
- Adesina, R. B., He, Z., Dada, O. A., Addey, C. I., 2022. Cohesiveness of the Nigerian Mahin mud coast sediment: Implications for erodibility and morphodynamic modelling. *Journal of African Earth Sciences*, 189, 104503.
- Amos, C.L., Christian, H.A., Grant, J., Paterson, D.M., 1992. A comparison of in-situ and laboratory methods to measure mudflat erodibility.
- Amos, C. L.; Sutherland, T. F., 1994. A rapid technique for the determination of dry sediment mass from saturated marine sands. *Journal of Sedimentary Research*, v. 64 [3], 668-670.
- Amos, C.L., Sutherland, T.F., Zevenhuizen, J., 1995. The stability of fine-grained sediments in Manitouk Sound, Hudson Bay, Canada. *Sedimentology*.
- Andersen, T.J., 2001. Seasonal variation in erodibility of two temperate, microtidal mudflats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 53, 1–12.
- Barry, K. M., R. J. Thieke, A. J. Mehta., 2006. Quasi-Hydrodynamic Lubrication Effect of Clay Particles on Sand Grain Erosion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67(1): 161–169.
- Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E., Winterwerp, J., 1993. The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering*, 21(1-3), 105-128.
- Burban, P. Y., Xu, Y. J., McNeil, J., Lick, W., 1990. Settling speeds of flocs in fresh water and seawater. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C10), 18213-18220.
- Butt, T.; Miles, J.; Ganderton, P.; Russell, P., 2002. A simple method for calibrating optical backscatter sensors in high concentrations of non-cohesive sediments. *Marine Geology, Plymouth*. PL4 8AA, v.192, p.419-424.
- Brady, N.C., Weil, R.R., 2002. *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.. 960pp.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, 2012; OBS-3+ and OBS300 suspended solids and turbidity monitors Operator's manual. Utah, p.58.

Carniello, L., Defina, A., D'Alpaos, L., 2012. Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind waves in shallow microtidal basins: application to the Venice Lagoon (Italy). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 102, 105–115.

Chen, D., Zheng, J., Zhang, C., Guan, D., Li, Y., Wang, Y., 2021. Critical Shear Stress for Erosion of Sand-Mud Mixtures and Pure Mud. *Frontiers in Marine Science*, 1502.

Cranford, P.J., G. Jr., D.C., 1992. The influence of dilute clay suspensions on sea scallop (*Placopecten magellanicus*) feeding activity and tissue growth. *Neth. J. Sea Res.* 30, 107–120.

Crooks, S., Pye, K., 2000. Sedimentological controls on the erosion and morphology of saltmarshes: implications for flood defence and habitat recreation. *Geological Society, London, Special Publications*, 175(1), 207-222.

Cuthbertson AJS, D. P, King S, Davies PA., 2008. Hindered settling velocity of cohesive/non-cohesive sediment mixtures. *Coast Eng* 55:1197–1208

Cuthbertson, A. J., Ibikunle, O., McCarter, W. J., Starrs, G., 2016. Monitoring and characterisation of sand-mud sedimentation processes. *Ocean Dynamics*, 66(6), 867-891.

Dickhudt, P. J., Carl T. F., Sanford P., 2011. Mud Matrix Solids Fraction and Bed Erodibility in the York River Estuary, USA, and Other Muddy Environments. *Continental Shelf Research* 31(10): S3–S13.

Dyer, K., 1986. Coastal and estuarine sediment dynamics. Chichester UK, John Willey & Sons, 358.

Droppo, I. G., Lau, Y. L., Mitchell, C., 2001. The effect of depositional history on contaminated bed sediment stability. *Science of the Total Environment*, 266(1-3), 7-13.

Droppo, I.G., 2009. Biofilm structure and bed stability of five contrasting freshwater sediments. *Marine and Freshwater Research* 60 (7), 690–699.

Dufois F., P., Hir, Le. 2015. Formulating fine to medium sand erosion for suspended sediment transport models. *Journal of Marine Science and Engineering*, 3, 3, 906-934.

Flemming, B.W., Delafontaine, M.T., 2000. Mass physical properties of muddy intertidal sediments: some applications, misapplications and nonapplications. *Continental Shelf Research* 20, 1179e1197.

Gailani, J. Z., Jin, L., McNeil, J., Lick, W., 2001. Effects of bentonite clay on sediment erosion rates. Army engineer waterways experiment station vicksburg ms engineer research and development center.

Gerbersdorf, S. U., Jancke, T., Westrich, B., 2005. Physico-chemical and biological sediment properties determining erosion resistance of contaminated riverine sediments—Temporal and vertical pattern at the Lauffen reservoir/River Neckar, Germany. *Limnologica*, 35(3), 132-144.

Gerbersdorf, S. U., Jancke, T., Westrich, B., 2007. Sediment properties for assessing the erosion risk of contaminated riverine sites. An approach to evaluate sediment properties and their covariance patterns over depth in relation to erosion resistance. First investigations in natural sediments (11 pp). *Journal of Soils and Sediments*, 7(1), 25-35.

Grabowski, R. C.; Droppo, I. G.; Wharton, G., 2011. Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth-Science Reviews* 105, 101–120.

Grabowski, R. C., Wharton, G., Davies, G. R., Droppo, I. G., 2012. Spatial and temporal variations in the erosion threshold of fine riverbed sediments. *Journal of Soils and Sediments*, 12(7), 1174-1188.

Grasso, F., Le Hir, P., Bassoullet, P. (2014, January). Analysis of mixed-sediment consolidation experiments. In XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier—Génie Civil. Dunkerque, 2-4 juillet 2014.

Grasso F, Le Hir P, Bassoullet P., 2015. Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dyn* 65:607–616.

Grim, R., 1962. *Applied Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, New York. 430pp.

Gillott, J.E., 1987. *Clay in Engineering Geology*. Elsevier, Amsterdam. 468pp.

Harris, R. J., Pilditch, C. A., Greenfield, B. L., Moon, V., Kröncke, I., 2016. The influence of benthic macrofauna on the erodibility of intertidal sediments with varying mud content in three New Zealand estuaries. *Estuaries and coasts*, 39(3), 815-828.

Hillel, D., 1982. *Introduction to soil physics.*, (Academic Press: San Diego, CA). *Introduction to soil physics*. Academic Press, San Diego, CA.

Hillier, S., 1995. Erosion, sedimentation and sedimentary origin of clays. In: Velde, B., ed. *Origin and mineralogy of clays: clays and de environment*. Berlin, Springer. p.162-214.

Hoath, S. D., 2016. *Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets*. Weinheim: John Wiley & Sons.

Jacobs, W., Le Hir, P., Van Kesteren, W., Cann, P., 2011. Erosion threshold of sand–mud mixtures. *Continental Shelf Research*, 31(10), S14-S25.

Kamphuis, J. W., 1990. Influence of sand or gravel on the erosion of cohesive sediment. *Journal of hydraulic research*, 28(1), 43-53.

Lick, W., Jin, L.J., Gailani, J., 2004. Initiation of movement of quartz particles. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 130 (8), 755–761.

Le Hir, P., Cann, P., Waeles, B., Jestin, H., Bassoullet, P., 2008. Erodibility of natural sediments: Experiments on sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests. INTERCOH 2005, Proc. in Marine Science. In T. Kusuda, H. Yamanishi, J. Spearman, & J. Z. Gailani (Eds.), *Sediment and ecohydraulics* (Vol.9, pp. 137e153). Elsevier, [https://doi.org/10.1016/S1568-2692\(08\)80013-7](https://doi.org/10.1016/S1568-2692(08)80013-7).

Le Hir, P., Cayocca, F., Waeles, B., 2011. Dynamics of sand and mud mixtures: a multiprocess-based modelling strategy. *Cont. Shelf Res.* 31, S135–S149.

Liu, X. L., Zheng, J. W., Zhang, H., Zhang, S. T., Liu, B. H., Shan, H. X., Jia, Y. G., 2018. Sediment critical shear stress and geotechnical properties along the modern Yellow River Delta, China. *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(8), 875-882.

Lick, W., Jin, L., Gailani, J., 2004. Initiation of movement of quartz particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(8), 755-761.

McAnally, W. H., Mehta, A. J. (Eds.), 2001. *Coastal and estuarine fine sediment processes*. Elsevier.

Mehta, A. J., Partheniades, E., 1982. Resuspension of deposited cohesive sediment beds, in *Proceedings of the 18th Conference on Coastal Engineering*, Cape Town.

Mehta, A. J., Hayter, E. J., Parker, W. R., Krone, R. B., Teeter, A. M., 1989. Cohesive sediment transport. I: Process description. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8), 1076-1093.

Mehta, A. J., Dyer, K. R., 1990. Cohesive sediment transport in estuarine and coastal waters, in *The Sea*, vol. 9, edited by B. Le Mehaute, D. M. Hanes, pp. 815–839, John Wiley, Hoboken, N.J.

Mehta A.J., 1991. Review notes on cohesive sediments erosion. *Coastal Sediments*, Kraus N.C.; Gingerich K.J.; Kriebel D.L. (Org.), ASCE, 40-53.

Mehta, A.J. and Lee. S.L., 1994. Problems in linking the threshold condition for the transport of cohesionless and cohesive sediment grain. *J. Coastal Res.*, 10(1): 170-177.

Mehta, A. J., Parchure, T. M., 2000. Surface erosion of fine-grained sediment revisited. In *Proceedings in Marine Science* (Vol. 2, pp. 55-74). Elsevier.

Mehta, A. J., e Letter, J. V.,2013. Comments on the transition between cohesive and cohesionless sediment bed exchange. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 131, 319–324.

Migniot, C.,1989. Tassement et rhéologie des vases. Première partie. La houille blanche, (1), 11-29.

Miller, M., McCave, I., Komar, P. D.,1977. Threshold of sediment motion under unidirectional current. *Sedimentology* 24, 507–527.

Mitchener, H., H. Torfs. 1996.; Erosion of Mud/Sand Mixtures. *Coast. Eng.* 29: 1–25.

Mook, DH; Hoskin, C.M., 1982. Organic determinations by ignition: caution advised. *Est. Coast. Shelf Sci.* 15: 697-699.

Mostafa, T. S.; Imran, J.; Chaudhry , M. H.;Irwin, I. B., 2008. Erosion resistance of cohesive soils, *Journal of Hydraulic Research*, 46:6, 777-787.

Muschenheim, D.K., Milligan, T.G., 1996. Flocculation and accumulation of fine drilling waste particulates on the scotian shelf (Canada). *Mar. Pollut. Bull.* 32 (10), 740–745.

Nguyen, H. M., Bryan, K. R., Pilditch, C. A., Moon, V. G., 2019. Influence of ambient temperature on erosion properties of exposed cohesive sediment from an intertidal mudflat. *Geo-Marine Letters*, 39(4), 337-347.

Oliveira, K. S., 2018. Influência das condições de vento e do aporte fluvial na dinâmica sedimentar do trecho centro-norte da Plataforma Continental do Espírito Santo (PCES). Tese de Doutorado. PPGOAM, UFES.

Paphitis, D. 2001. Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves. *Coastal Engineering*, 43(3-4), 227-245.

Parchure, T. M., Mehta, A. J.,1985. Erosion of soft cohesive sediment deposits. *Journal of hydraulic engineering*, 111(10), 1308-1326.

Pratt, D.R., Pilditch, C.A., Lohrer, A.M., Thrush, S.F., 2014. The effects of short-term increases in turbidity on sandflat microphytobenthic productivity and nutrient fluxes. *J. Sea Res.* 92, 170–177.

Perera, C., Smith, J., Wu, W., Perkey, D., Priestas, A., 2020. Erosion rate of sand and mud mixtures. *International Journal of Sediment Research*, 35(6), 563-575.

Perkey, D. W.; Smith, S. J., 2020. Priestas, Anthony M. Erosion Thresholds and rates for Sand Mud Mixtures. Engineer Research and Development Center (US) Vicksburg Estados Unidos.

Piedra-Cueva, I., Mory, M., 2000. Erosion of a deposited layer of cohesive sediment. In *Proceedings in Marine Science* (Vol. 3, pp. 41-51). Elsevier.

Quaresma, V. S.; Amos, C. L.; Flindt, M., 2004. The Influence of biological activity and consolidation time on laboratory cohesive beds. *Journal of Sedimentary Research*, v.74, n.2, p.184-190.

Quaresma, V.S., Catabriga, G.M., Bourguignon, S.C., Godinho, E., Bastos, A. C., 2015. Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. *Brazilian Journal of Geology*, 45, 635-644.

Ravisangar, V., Sturm, T. W., Amirtharajah, A., 2005. Influence of sediment structure on erosional strength and density of kaolinite sediment beds. *Journal of hydraulic engineering*, 131(5), 356-365.

Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D., & Lick, W., 1998. Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(12), 1261-1267.

Sanford, L. P., Maa, J. P.-Y., 2001. A unified erosion formulation for fine sediments. *Mar. Geol.* 179, 9–23.

Sanford, L. P., 2008. Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring. *Computers & Geosciences*, 34(10), 1263-1283.

Schallenberg, M., Burns, C.W., 2004. Effects of sediment resuspension on phytoplankton production: teasing apart the influences of light, nutri and algal entrainment. *Freshw. Biol.* 49, 143–159.

Sills, G. C., 1994. Hindered settling and consolidation in cohesive sediments. In *4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference INTERCOH* (Vol. 94).

Silva, A. E., 2017. *Evolução sedimentar recente ao longo de uma plataforma continental com estilo contrastante de sedimentação*. Tese de Doutorado. PPGOAM, UFES.

Soulsby, R. L., 1997. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. *Oceanographic Literature Review*, 9(44), 947.

Righetti, M., Lucarelli, C., 2007. May the Shields theory be extended to cohesive and adhesive benthic sediments? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C5).

Te Slaa, S., He, Q., van Maren, D. S., Winterwerp, J. C., 2013. Sedimentation processes in silt-rich sediment systems. *Ocean Dynamics*, 63(4), 399-421.

- Ternat, F., Boyer, P., Anselmet, F., and Amielh, M., 2008. Erosion threshold of saturated natural cohesive sediments: modeling and experiments. *Water Resour. Res.* 44:W11434
- Torfs, H., Mitchener, H., Huysentruyt, H., Toorman, E., 1996. Settling and consolidation of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering*, 29(1-2), 27-45.
- Torfs, H., J. Jiang, A. J. Mehta. 2000. Assessment of the Erodibility of Fine/Coarse Sediment Mixtures. In *Proceedings in Marine Science*, vol. 3. Elsevier.
- Van Ledden M, Van Kesteren WGM, Winterwerp JC., 2004. A conceptual framework for the erosion behaviour of sand–mud mixtures. *Cont Shelf Res* 24(1):1–11.
- Van Rijn, L. C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas (Vol. 1006, pp. 11-3). Amsterdam: Aqua publications.
- Van Rijn, L.C., Riethmueller, R., Barth, R., Perk, L.L., 2017. Erodibility of sand-mud mixtures at the bottom of tidal channels Critical bed-shear stress of mud-sand sample. 10th International SedNet Conference “Sediments on the move” 14-17 June 2017, Genoa, Italy.
- Van Rijn, L. C., 2020. Erodibility of mud–sand bed mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(1), 04019050.
- Vieira, F. V., 2017. Sedimentação da Plataforma Continental do Espírito Santo: do aporte terrígeno à ocorrência de fundos recifais. Dissertação de Mestrado. PPGOAM, UFES.
- Xu, Y., 2019. Approach to the erosion threshold of cohesive sediments. *Ocean Engineering*, 172, 183-190.
- Zhang, M., Yu, G., La Rovere, A., Ranzi, R., 2017. Erodibility of fluidized cohesive sediments in unidirectional open flows. *Ocean Engineering*, 130, 523-530.
- Zreik, D. A., Krishnappan, B. G., Germaine, J. T., Madsen, O. S., Ladd, C. C., 1998. Erosional and mechanical strengths of deposited cohesive sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(11), 1076-1085.
- Yanga, Y.; Gaoa, S.; Wanga, Y. P.; Jiaa, J.; Xiong, J.; Zhoua, L., 2019. Revisiting the problem of sediment motion threshold. *Continental Shelf Research* 187, 103960. erodability of intertidal sediments. *Continental Shelf Research* 27, 1174–1189.
- Waeles, B., 2005. Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine (Doctoral dissertation, Université de Caen Basse-Normandie).
- Walsh, J.P., Nittrouer, C.A., 1994. Understanding fine-grained river-sediment dispersal on continental margins. *Mar. Geol.* 263, 34–45.

Waqas, A.; Neumeier, U.; Rochon, A., 2020. Seasonal changes in sediment erodibility associated with biostabilization in a subarctic intertidal environment, St. Lawrence Estuary, Canada. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 245, p. 106935.

Winterwerp, J. C.; Van Kesteren, W. G. M., 2004 *Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment*. Editor T. Van Loon, Elsevier.

Whitehouse, R.; Solsby, R.; Roberts, W.; Mitchener, H., 2000. *Dynamics of estuarine muds*. 1. ed. Londres: Thomas Telford Publishing. 210 p.

Wu, W., Perera, C., Smith, J., & Sanchez, A., 2018. Critical shear stress for erosion of sand and mud mixtures. *Journal of Hydraulic Research*, 56(1), 96-110.

APÊNDICE A: AMOSTRAS UTILIZADAS PARA REALIZAR OS EXPERIMENTOS

Figura A-1: Areia utilizada nos experimentos.



Figura A-2: Amostra de argila industrial (AR) utilizada para realizar os experimentos.



Figura A-3: Amostra da amostra PCL utilizada para realizar os experimentos.



Figura A-4: Equipamento - CATER utilizado para realizar os experimentos.



APÊNDICE B: CALIBRAÇÕES DO OBS DAS AMOSTRAS COM DIFERENTES PORCENTAGENS DE AREIA.

Figura 1-B: Calibração OBS das amostras AR com adição de 15 a 90% de areia fina.

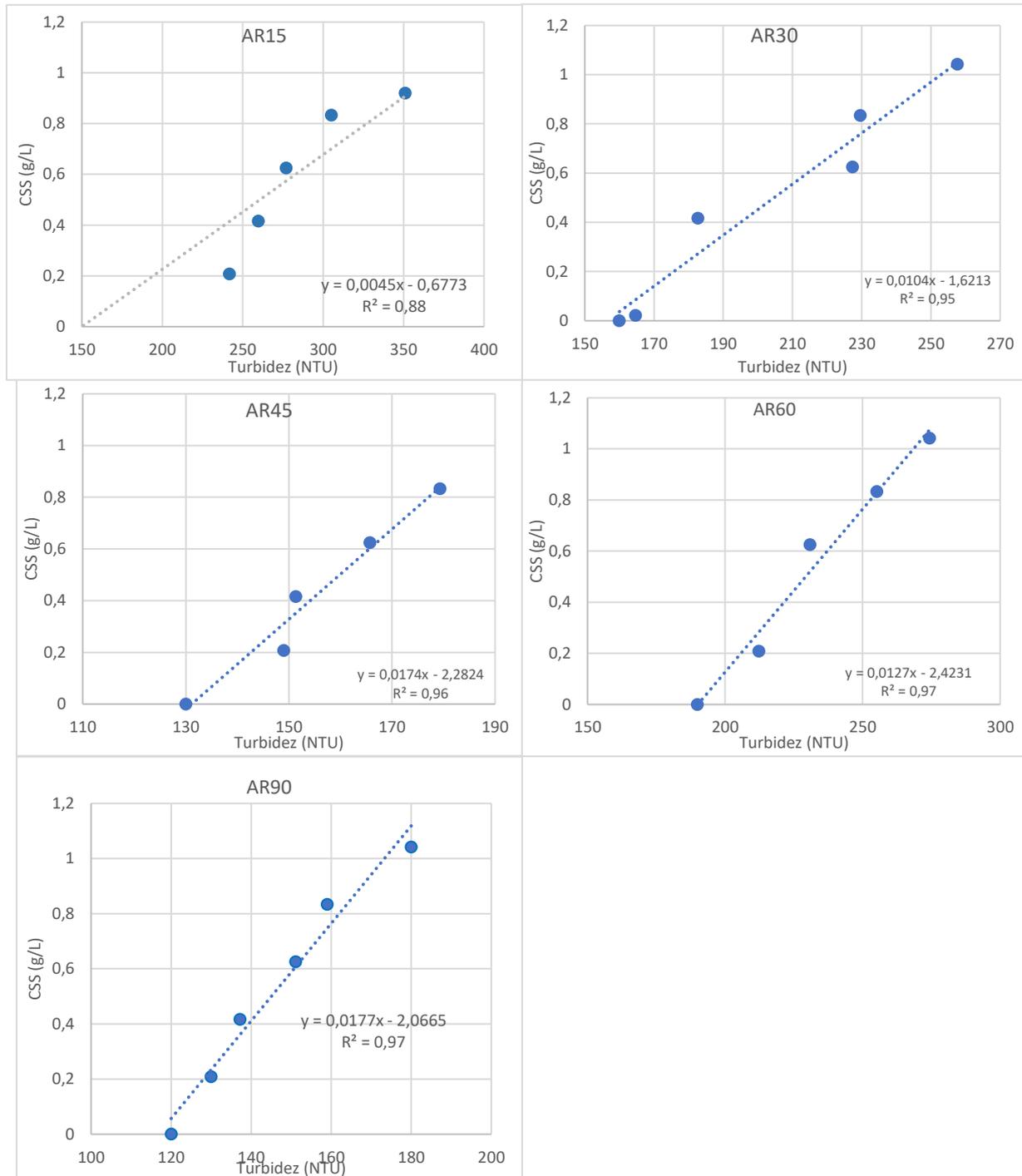


Figura 2B: Calibração OBS3 das amostras PC com adição de 30 a 90% de areia fina.

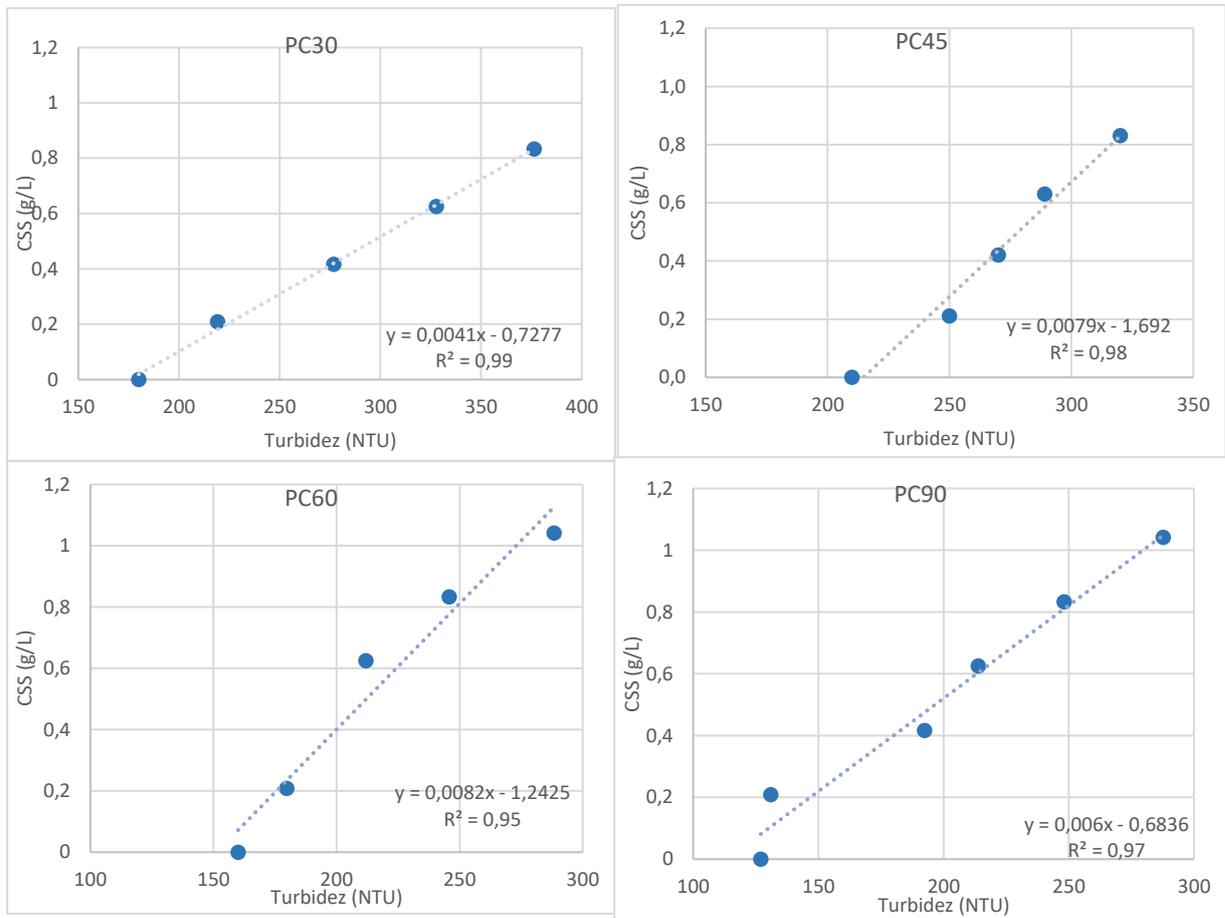
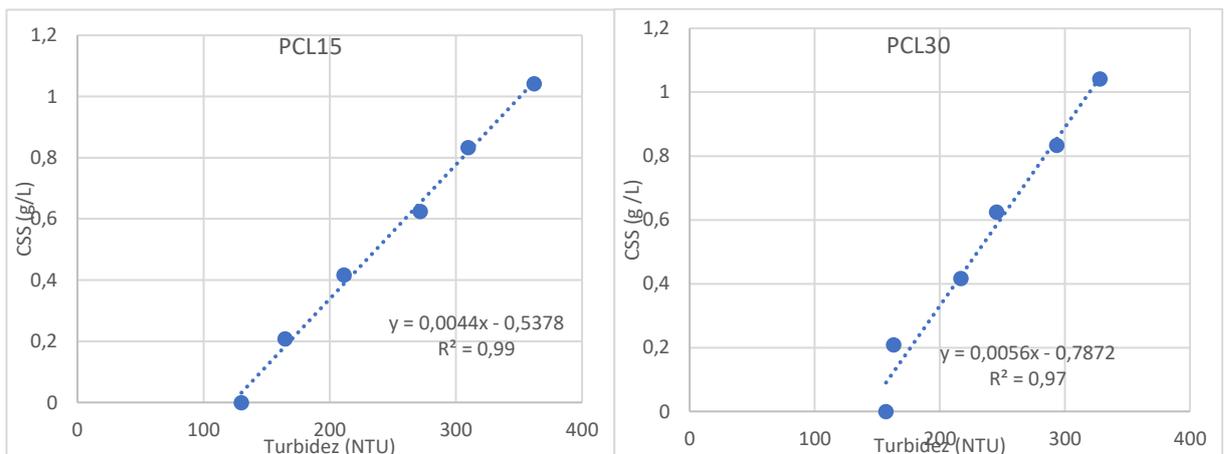
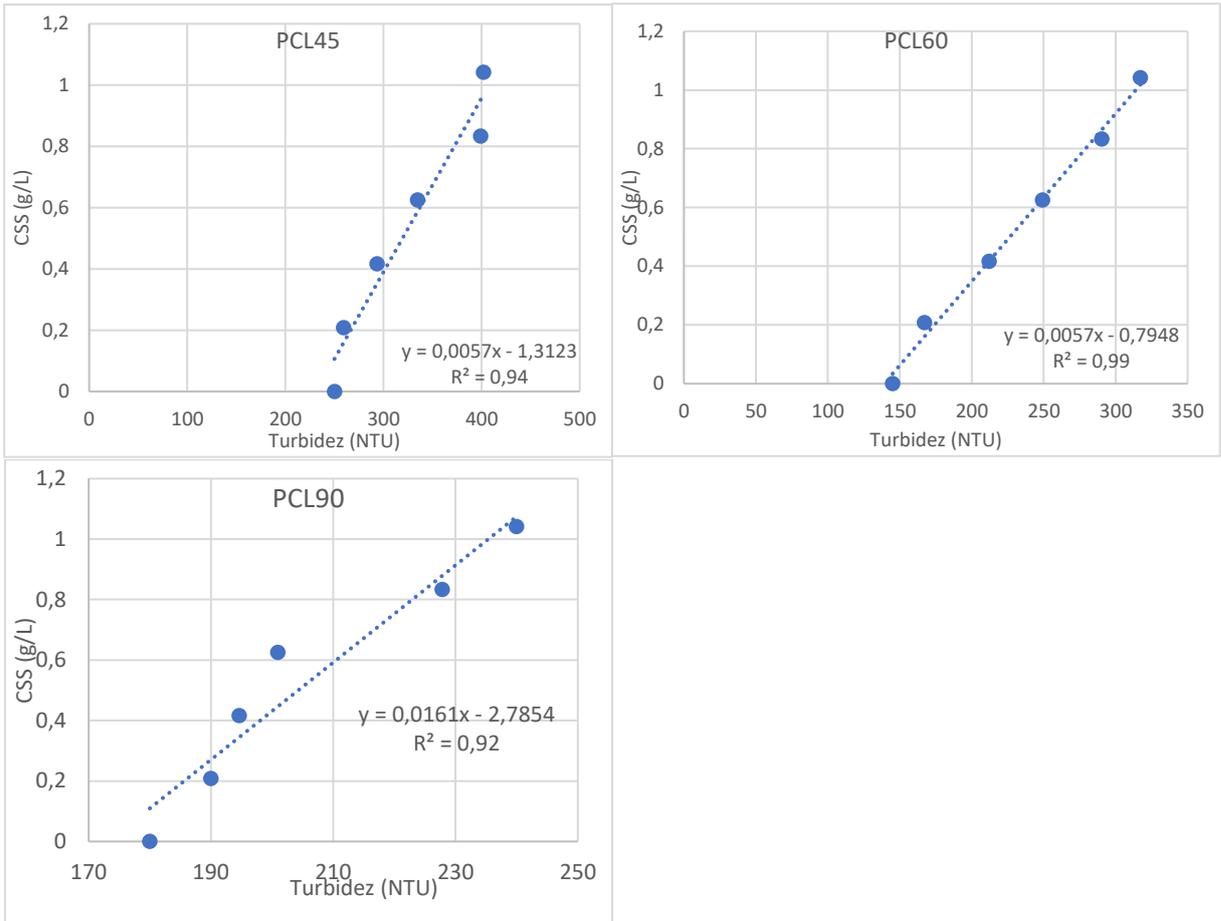


Figura 3-B: Calibração OBS3 das amostras PC com adição de 15 a 90% de areia fina.





APÊNDICE C: CURVAS DE DECANTAÇÃO

Figura 1-C: Curvas de decantação da amostra AR durante duas horas de medição.

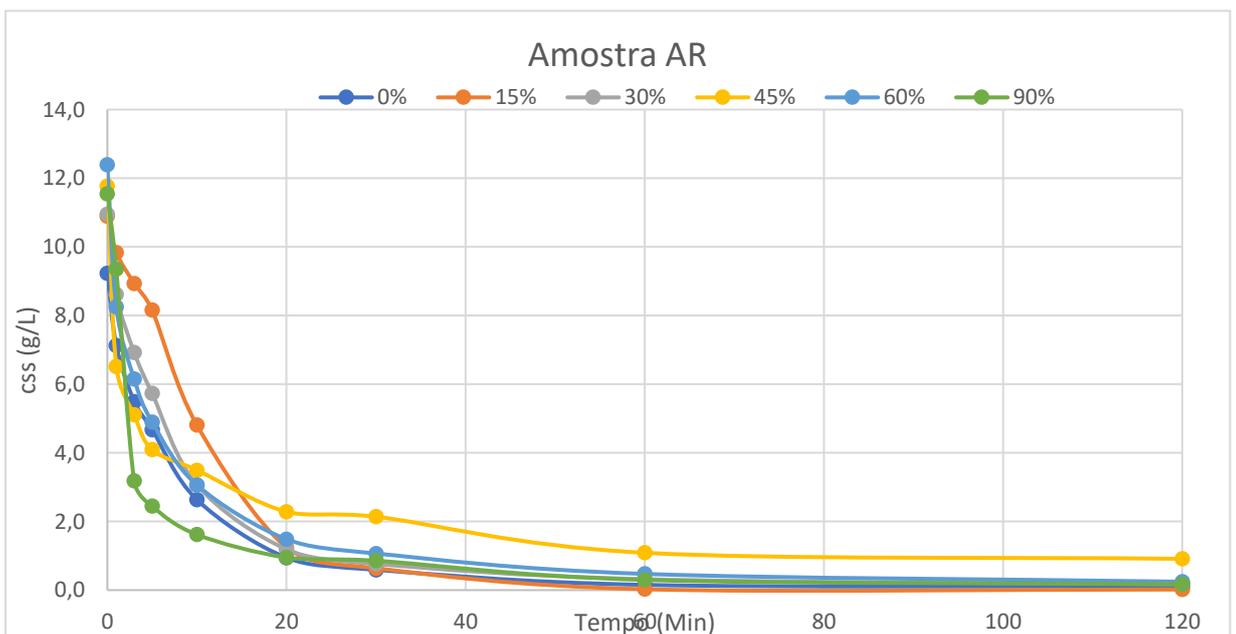


Figura 2-C: Curvas de decantação da amostra PC durante duas horas de medição.

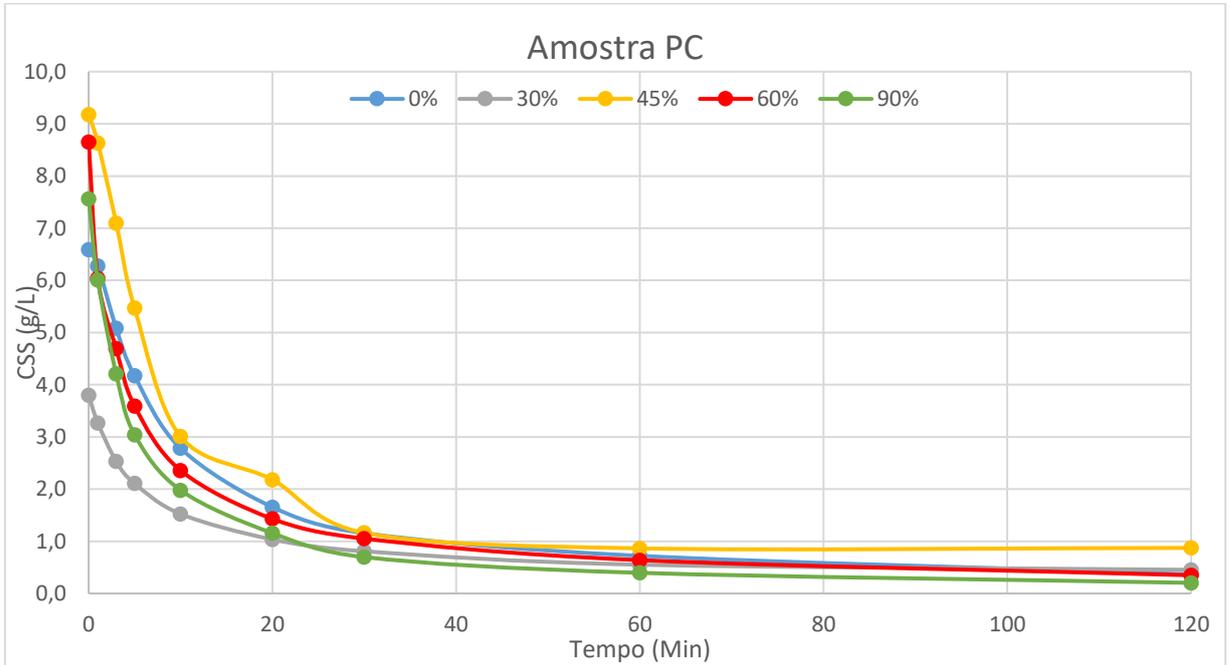


Figura 3-C: Curvas de decantação da amostra PCL durante duas horas de medição.

