



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

GABRIELA PITOLLI LYRA

**Aplicação das cinzas da indústria sucroalcooleira como biopozolanas e K-
fertilizante: cana-de-açúcar e cana-energia**

Orientadores: Prof. Dr. João Adriano Rossignolo (USP)

Prof. Dr. Jorge Juan Payá Bernabeu (UPV)

Co-orientadora: María Nieves Sanjuán Pellicer (USP)

Pirassununga, abril de 2023

Sumário

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	29
1.1 Hipótese	32
2 OBJETIVOS	33
2.1 Objetivos específicos	33
3 REVISÃO DA LITERATURA	34
3.1 Cimento Portland	34
3.2 Materiais pozolânicos	39
3.3 Cinzas de cana-de-açúcar	41
3.4 Cinzas de cana-energia	47
3.5 Potássio extraído da cana-de-açúcar e da cana-energia	49
3.6 Avaliação do ciclo de vida	50
3.6.1 Definição de Objetivo e Escopo	53
3.6.1.1 Objetivo	53
3.6.1.2 Escopo	54
3.6.2 Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)	57
3.6.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)	59
3.6.4 Interpretação do ciclo de vida	61
3.6.5 Comunicação e análise crítica	63
3.6.6 Aplicações da avaliação de ciclo de vida em compósitos cimentícios	64
4 METODOLOGIA	68
4.1 Matérias-Primas	69
4.2 Análise química para avaliação da fertilidade do solo	70
4.3 Coleta e preparação da cana-de-açúcar e da cana-energia	71
4.4 Caracterização morfológica da cana-energia e da cana-de-açúcar	71
4.5 Obtenção das cinzas da cana-energia e da cana-de-açúcar	72
4.6 Extração de produtos solúveis das cinzas	72
4.7 Análise da Solução de lavagem da cinza	73
4.8 Caracterização das cinzas e da sílica ativa	73

4.8.1	Fluorescência de Raios-X (FRX) e perda ao fogo (PF)	73
4.8.2	Difração de raios X (DRX)	73
4.8.3	Termogravimetria (TG/DTG)	73
4.8.4	Granulometria a laser (ADL)	74
4.8.5	Massa específica real	74
4.8.6	Microscopia eletrônica de varredura por emissão associado ao espectrômetro de energia dispersiva (FSEM-EDS)	74
4.8.7	Determinação dos teores da sílica amorfa e da sílica cristalina	75
4.9	Estudos de Reatividade das cinzas de cana-energia, de cana-de-açúcar e da sílica ativa	78
4.9.1	Análise da fixação de cal por termogravimetria (TG/DTG)	78
4.9.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas pastas com hidróxido de cálcio e cimento	79
4.9.3	Avaliação de reatividade pozolânica	79
4.9.4	Ensaio de Frattini	80
4.10	Avaliação da influência das cinzas da cana-energia, da cana-de-açúcar e da sílica ativa no desempenho de argamassas de cimento Portland	80
4.10.1	Preparação das argamassas	80
4.10.1.1	Massa específica e absorção de água	81
4.10.1.2	Resistência à compressão	82
4.10.1.3	Carbonatação acelerada	82
4.10.1.4	Porosidade por intrusão de mercúrio (PIM)	83
4.11	Avaliação de ciclo de vida	84
4.11.1	Objetivo	84
4.11.2	Escopo	85
4.11.3	Interpretação, discussão e conclusão	93
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
5.1	Análise química para avaliação da fertilidade do solo	95
5.2	Caracterização morfológica da cana-energia e da cana-de-açúcar	96

5.3 Análise da Solução de Potássio	101
5.4 Caracterização das cinzas e da sílica ativa	102
5.4.1 Fluorescência de Raios-X (FRX) e perda ao fogo (PF)	102
5.4.2 Difração de raios X (DRX)	106
5.4.3 Termogravimetria (TG/DTG)	111
5.4.4 Granulometria	112
5.4.5 Massa específica real	113
5.4.6 Microscopia eletrônica de varredura por emissão associado ao espectrômetro de energia dispersiva (FSEM-EDS)	114
5.4.7 Determinação dos teores da sílica amorfa e da sílica cristalina	117
5.5 Estudos de reatividade das cinzas de cana-energia, de cana-de-açúcar e da sílica ativa	118
5.5.1 Análise da fixação de cal por termogravimetria (TG/DTG)	118
5.5.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas pastas com cimento e hidróxido de cálcio	122
5.5.3 Avaliação de reatividade pozolânica	124
5.5.4 Ensaio de Frattini	135
5.6 Avaliação da influência das cinzas da cana-energia, da cana-de-açúcar e da sílica ativa no desempenho de argamassas de cimento Portland	136
5.6.1 Absorção de água, porosidade aparente e massa específica	136
5.6.2 Resistência a compressão	139
5.6.1 Carbonatação acelerada	140
5.5.4 Porosidade por intrusão de mercúrio (PIM)	141
5.7 Avaliação de ciclo de vida comparativa	142
5.7.1 Mudanças Climáticas	144
5.7.2 Formação de partículas finas	146
5.7.3 Depleção fóssil	147
5.7.4 Consumo de água doce	148
5.7.5 Ecotoxicidade de água doce	149

5.7.6 Eutrofização de água doce	150
5.7.7 Toxicidade humana [câncer]	151
5.7.8 Toxicidade humana [não câncer]	152
5.7.9 Radiação ionizante	153
5.7.10 Uso da terra	154
5.7.11 Ecotoxicidade marinha	155
5.7.12 Eutrofização marinha	156
5.7.13 Depleção metálica	157
5.7.14 Formação de ozônio fotoquímico [ecossistemas e saúde humana]	158
5.7.15 Depleção de ozônio estratosférico	159
5.7.16 Acidificação terrestre	160
5.7.17 Ecotoxicidade terrestre	161
5.7.18 Interpretação do ciclo de vida	163
6 CONCLUSÕES	166
REFERÊNCIAS	168