



DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE PELOTAS VERDES DE MINÉRIO DE FERRO

Rafaella Fernanda de Almeida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE PELOTAS VERDES DE MINÉRIO DE FERRO

Rafaella Fernanda de Almeida

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D

Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.

Pesq. Sílvia Cristina Alves França, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2019

Almeida, Rafaella Fernanda

Degradação mecânica de pelotas verdes de minério de ferro /Rafaella Fernanda de Almeida. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIII, 108 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 102-108.

1. Pelotização 2. Degradação I. Tavares, Luís Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo amor, dedicação, ensinamentos e apoio, pois sem eles nada disso seria possível.

Ao meu orientador Prof. Luís Marcelo Marques Tavares por todo o tempo que dedicou a me ajudar durante o processo de realização deste trabalho.

À Vale S.A pela oportunidade de atuar em um projeto como este e ao Laboratório de Tecnologia Mineral pela infraestrutura necessária para que eu alcançasse meus objetivos.

E enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, seja de forma direta ou indireta, fica registrado aqui, o meu muito obrigada!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE PELOTAS VERDES DE MINÉRIO DE FERRO

Rafaella Fernanda de Almeida

Setembro/2019

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O manuseio e transporte de pelotas verdes no interior da unidade de pelotamento pode causar degradação mecânica. Quando ocorre, essa degradação pode implicar em maior reciclo e retrabalho no circuito, podendo até prejudicar a qualidade do produto final após queima. A resistência mecânica de pelotas verdes deve ser suficiente para suportar essa etapa de manuseio. O presente trabalho tratou da produção de pelotas verdes em escala laboratorial, com o objetivo de estudar a influência do teor de bentonita nas características mecânicas de pelotas verdes, além do efeito de variáveis de manuseio na resistência mecânica: tamanho da pelota, altura de queda, superfície de impacto, ângulo de impacto, modo de aplicação dos esforços e velocidade de carregamento na quebra de pelotas verdes. O aumento do teor de bentonita resultou em aumento da resistência das pelotas ao impacto. Pelotas de tamanhos menores também apresentaram maior resistência à compressão e impactos de baixa magnitude. Pelotas apresentaram maior resistência quando submetidas a carregamento a taxas mais altas, bem como ao carregamento simples (queda) do que ao duplo (compressão). O aumento da energia de impacto, bem como da altura de queda, resultou no aumento da degradação das pelotas. Entretanto, observa-se que, para impactos com alturas superiores a 25 cm, que a altura total de queda foi a variável que definiu a proporção de pelotas fragmentadas, e não a altura usada em cada impacto. A fim de evidenciar o efeito do dano causado às pelotas verdes pelos impactos, pelotas intactas e previamente danificadas foram submetidas a queima, tendo sido demonstrado que a resistência das danificadas foi muito inferior àquela das intactas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

MECHANICAL DEGRADATION OF GREEN IRON ORE PELLETS

Rafaella Fernanda de Almeida

September/2019

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Handling and transporting of green pellets inside the pelletizing unit may cause mechanical degradation. When this occurs, the degradation may lead to greater recycling and rework in the circuit, and may even have deleterious effect on the quality of the final product after firing. The mechanical strength of green pellets should be high enough to withstand this handling step. The present work dealt with the production of green pellets on a laboratory scale, aiming to study the influence of bentonite content on the mechanical characteristics of green pellets, as well as the effect of handling variables on mechanical strength: pellet size, drop height, impact surface, angle of impact, mode of application of forces and loading speed when breaking green pellets. Increasing the bentonite content resulted in increased pellet resistance to impact. Smaller sized pellets also showed higher compressive strength and low magnitude impacts. Pellets showed higher resistance when subjected to loading at higher rates, as well as to single loading (drop test) than to double loading (compression). Increased impact energy as well as drop height resulted in increased pellet degradation. However, it is observed that, for impacts with heights greater than 25 cm, that the total fall height was the variable that defined the proportion of fragmented pellets, not the height used in each impact. In order to evidence the effect of damage to green pellets by impacts, intact and previously damaged pellets were fired, and it was shown that the resistance of damaged pellets was much lower than that of intact pellets.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO GERAL.....	4
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	MINÉRIO DE FERRO E SUA IMPORTÂNCIA NA ECONOMIA BRASILEIRA.....	5
3.2	MINERAIS DE FERRO.....	6
3.3	PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO.....	7
3.4	FORMAÇÃO DAS PELOTAS VERDES.....	12
3.4.1	Formação das pontes líquidas.....	13
3.4.2	Mecanismos de crescimento dos grânulos.....	14
3.5	MATÉRIAS-PRIMAS E VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE PELOTAMENTO.....	17
3.5.1	Umidade.....	19
3.5.2	Distribuição granulométrica e superfície específica.....	20
3.5.3	Aglomerantes.....	22
3.6	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PELOTAS VERDES.....	27
3.7	DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DURANTE O MANUSEIO.....	34
3.7.1	Influência do número de impactos e da altura total de queda.....	38
3.7.2	Efeito da estabilização e ordem dos eventos de impacto.....	38
3.7.3	Efeito da superfície de impacto.....	39
3.7.4	Efeito do tamanho de partícula.....	39
3.8	COMPORTAMENTO DE MATERIAIS FRÁGEIS E DÚCTEIS.....	40
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	53
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	53
4.2	ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.....	54
4.3	FORMAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS PELOTAS VERDES.....	55
4.4	ENSAIOS DE QUEDA.....	56
4.5	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	59
4.6	ENSAIOS EM CÉLULA DE CARGA DE IMPACTO (CCI).....	62
4.7	ETAPA DE ENDURECIMENTO DAS PELOTAS VERDES.....	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65

5.1	ESTUDO DA DEGRADAÇÃO E AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS PELOTAS VERDES	65
5.1.1	Erro experimental	65
5.1.2	Efeito da altura de queda.....	66
5.1.3	Efeito do tamanho das pelotas.....	71
5.1.4	Efeito da superfície de impacto	74
5.1.5	Efeito do ângulo de impacto.....	77
5.1.6	Efeito da quantidade de bentonita	79
5.1.7	Efeito da velocidade de carregamento	81
5.1.8	Efeito da energia específica de impacto.....	86
5.2.	IMPLICAÇÕES DO DANO ÀS PELOTAS VERDES EM SUA RESISTÊNCIA APÓS ENDURECIMENTO.....	88
5.3.	DISCUSSÃO.....	91
6	CONCLUSÕES	99
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Etapas do processo de pelotamento.....	9
Figura 3.2 Vista frontal do disco pelotizador	10
Figura 3.3 Orientação do disco pelotizador.....	11
Figura 3.4 Forças interparticulares do processo de pelotização a) pontes sólidas b) interligação de partículas c) pontes líquidas.....	12
Figura 3.5 Diferentes estágios das ligações líquidas em grânulos: a) pendular b) funicular c) capilar e d) fase da gotícula	13
Figura 3.6 Mecanismos de crescimento dos grânulos	15
Figura 3.7 Abordagem moderna dos mecanismos de crescimento dos grânulos	16
Figura 3.8 Ângulo de contato de uma gota de líquido com a superfície sólida	20
Figura 3.9 Pelotas na faixa de 10-12,5 mm com alto teor de umidade (9,3%)	23
Figura 3.10 Adesão das argilas presentes na bentonita às partículas minerais	24
Figura 3.11 Efeito da bentonita na cinética de crescimento das pelotas.....	25
Figura 3.12 Número de revoluções do tambor necessário para produzir pelotas com um diâmetro médio conhecido em função da quantidade de bentonita adicionada	26
Figura 3.13 Resistência à compressão em relação à dosagem de bentonita	29
Figura 3.14 Número de queda em função da dosagem de bentonita.....	30
Figura 3.15 Número de queda para pelotas de óxido de ferro usando diferentes tipos de aglomerantes orgânicos e inorgânicos	31
Figura 3.16 Propriedades físicas das pelotas em função do grau de finura na alimentação	32
Figura 3.17 Propriedades física das pelotas em função do teor de umidade.....	33
Figura 3.18 Resposta do teste de queda em função da variação da umidade na formação das pelotas verdes	33
Figura 3.19 Layout dos estágios de transferência em diferentes alturas de uma usina de pelotização.....	35
Figura 3.20 Mecanismos de geração de produtos degradados	36
Figura 3.21 Acúmulo de dano na partícula devido à impactos repetidos	37
Figura 3.22 Curva de tensão versus deformação para materiais frágeis e dúcteis	40
Figura 3.23 Evolução do estudo sobre microfissuras durante a deformação elástica e plástica.....	41
Figura 3.24 Vista lateral das formas de fratura: (a) grânulo sólido (b) grânulo úmido (c) grânulo sem aglomerante	42
Figura 3.25 Fratura de grânulos úmidos após impactos de velocidade baixa	43
Figura 3.26 Fratura de grânulos úmidos após impactos de velocidade intermediária....	44
Figura 3.27 Fratura de grânulos úmidos após impactos de velocidade alta.....	44
Figura 3.28 Exemplo de fratura de impacto para três tipos genéricos de aglomerados..	45
Figura 3.29 Comportamento das três amostras de granulados	46
Figura 3.30 Curva de força versus deslocamento do γ - Al_2O_3	47
Figura 3.31 Curva de força versus deslocamento do zeólita sintética	48
Figura 3.32 Curva de força versus deslocamento do benzoato de sódio	48
Figura 3.33 Influência do tamanho do grânulo na curva de força versus deslocamento (a) Zeólita sintética (b) Benzoato de sódio.....	49

Figura 3.34 Curvas de força versus deslocamento da zeólita sintética para diferentes velocidades de carregamento.....	50
Figura 3.35 Efeito da carga e descarga na curva de força versus deslocamento de zeólita sintética	50
Figura 3.36 Ilustração da curva de força versus tempo medida em um impacto na CCI	52
Figura 4.1 Preparação das amostras: a) amostras de <i>pellet feed</i> ; b) pesagem do aglomerante bentonita; c) adição de água na mistura (<i>pellet feed</i> + aglomerante).....	54
Figura 4.2 Ensaio para a produção das pelotas verdes: a) misturador Eirich; b) aspersão de água; c) pelotas verdes formadas	55
Figura 4.3 Pelotas classificadas em diferentes faixas de tamanhos.....	56
Figura 4.4 Classificação das pelotas verdes a) retirada das pelotas do disco; b) peneiramento; c) acondicionamento das pelotas de acordo com as faixas de tamanho..	56
Figura 4.5 Formas de dano de pelotas verdes nos ensaios de queda: a) iniciação da trinca; b) afloramento da trinca na superfície da pelota; c) lascamento d) perda total da integridade	58
Figura 4.6 Estação de teste de queda: a) dispositivo com a superfície de aço; b) dispositivo com a superfície de borracha c) aparato de inclinação da superfície para ensaio com ângulos variados	59
Figura 4.7 Decomposição da componente de força exercida pela pelota à superfície com inclinação.....	59
Figura 4.8 Compressão das pelotas verdes: a) pesagem das pelotas; b) prensa hidráulica INSTRON; c) pelota após o ensaio.....	60
Figura 4.9 Célula de Carga de Impacto (CCI).....	62
Figura 4.10 Impactores de aço utilizados nos testes na CCI.....	63
Figura 4.11 Etapa de endurecimento: a) forno mufla Linn Elektro Therm; b) vista interior do forno mufla; c) cadinho de porcelana com as pelotas secas; d) pelotas após o processo de queima	64
Figura 5.1 Número de queda pelo teste de queda padrão e teor de umidade de cada batelada	66
Figura 5.2 Efeito da altura de queda para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm para o caso da fratura de pelotas	66
Figura 5.3 Proporção de pelotas trincadas e fraturadas em função do número de impactos para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm	68
Figura 5.4 Número de incidência de trinca e quebra para cada pelota na faixa de 10 - 12,5 mm em cada altura de impacto. Os números indicam os quantitativos de dados superpostos na figura, enquanto as cores indicam as alturas de queda (em cm).....	69
Figura 5.5 Histograma representativo das incidências de trinca e quebra para cada altura de impacto	69
Figura 5.6 Alternância das alturas de queda para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm para a fratura de pelotas	70
Figura 5.7 Efeito do tamanho das pelotas verdes na proporção de pelotas quebradas a diferentes alturas de queda no aço: a) alturas de 46, 75 e 100 cm; b) altura de 25 cm...	72
Figura 5.8 Distribuições de resistência à compressão de pelotas verdes para as diferentes faixas estudadas (10 mm/min).....	73
Figura 5.9 Resultados da energia específica de fratura por compressão para pelotas verdes para as diferentes faixas estudadas (10 mm/min).....	73

Figura 5.10 Resultados da rigidez por compressão para pelotas verdes para as diferentes faixas estudadas (10 mm/min).....	74
Figura 5.11 Efeito da superfície de impacto para fratura de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm nas diferentes alturas de queda: a) 25 cm; b) 46, 75 e 100 cm	75
Figura 5.12 Número de queda para cada tipo de superfície para fratura de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm	76
Figura 5.13 Efeito do tamanho das pelotas verdes na proporção de pelotas fraturadas em função das alturas de queda na borracha: a) 46, 75 e 100 cm; b) 25 cm	77
Figura 5.14 Resultados do número de queda para os ângulos de 45°, 60° e 90° em superfície de aço para pelotas verdes na faixa de 10–12,5 mm	78
Figura 5.15 Efeito do ângulo de impacto na proporção de pelotas fraturadas em função das alturas de queda na borracha: a) 46, 75 e 100 cm; b) 25 cm.....	79
Figura 5.16 Efeito do teor de bentonita na formação das pelotas verdes na proporção de pelotas quebradas à altura de 46 cm (pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm).....	80
Figura 5.17 Curvas de força “versus” deslocamento predominantes do teste de compressão: a) tipo 1; b) tipo 2; c) tipo 3	82
Figura 5.18 Efeito da velocidade de carregamento na proporção de pelotas trincadas para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm.....	84
Figura 5.19 Sequência de compressão em velocidade máxima (500 mm/min) de uma pelota verde na faixa de 10 – 12,5 mm	85
Figura 5.20 Sequência de compressão em velocidade baixa (1 mm/min) de uma pelota verde na faixa de 10–12,5 mm.....	86
Figura 5.21 Curva força “versus” deslocamento em velocidade baixa (1 mm/min) para uma pelota na faixa de 10–12,5 mm	86
Figura 5.22 Proporção de pelotas fraturadas a uma velocidade de impacto de 1,4 m/s na Célula de Carga de Impacto (CCI) com diferentes tamanhos de impactores para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm	87
Figura 5.23 Sequência de imagens do teste da Célula de Carga de Impacto com energia específica de 8,48 J/kg: a) antes do primeiro impacto; b) após o primeiro impacto; c) desintegração total da pelota	88
Figura 5.24 Resultados de energia de fratura por compressão para pelotas queimadas intactas (réplicas relativas à 1ª e 2ª queima) e as pelotas submetidas a quatro impactos de 46 cm (sobreviventes).....	89
Figura 5.25 Resultados de resistência por compressão para pelotas queimadas intactas e sobreviventes	90
Figura 5.26 Resultados da rigidez por compressão para pelotas queimadas intactas e sobreviventes	90
Figura 5.27 Quebra cumulativa das pelotas verdes em relação à altura cumulativa de queda para impactos simples de pelotas contidas na faixa 10–12,5 mm	91
Figura 5.28 Quebra cumulativa das pelotas verdes em relação à energia cumulativa de impacto para impacto duplo de pelotas contidas na faixa 10–12,5 mm	92
Figura 5.29 Número médio de queda em relação a altura de queda em cada impacto no aço	93
Figura 5.30 Comparação do estudo de Salman <i>et al.</i> (2004) (esquerda) para regime de fratura à baixas energias com os ensaios realizados no presente trabalho (direita).....	94

Figura 5.31 Comparação dos estudos de Salman <i>et al.</i> (2004) (esquerda) para regime de fratura a energias intermediárias com os ensaios realizados no presente trabalho (direita)	95
Figura 5.32 Comparação dos estudos de Salman <i>et al.</i> (2004) (esquerda) para regime de fratura à altas energias com os ensaios realizados no presente trabalho (direita)	95
Figura 5.33 Energia mediana de trincamento em relação à velocidade de carregamento	96
Figura 5.34 Quebra cumulativa das pelotas verdes contidas na faixa 10–12,5 mm em relação à altura cumulativa de queda para cada tipo de superfície de pelotas nas alturas extremas a) 100 cm b) 25 cm	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 Características químicas e físicas do pellet feed	53
Tabela 4-2 Velocidade e energia de impacto em queda livre correspondentes a cada altura de queda.....	57
Tabela 5.1 Número de queda para diferentes alturas de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm.....	67
Tabela 5.2 Propriedade dos materiais de superfície de impacto.....	74
Tabela 5.3 Classificação dos tipos de curva de força versus deslocamento para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm para diferentes taxas de carregamento	83

1 INTRODUÇÃO

A pelotização de minério de ferro é considerada um processo relativamente novo comparado à história da mineração e metalurgia que datam da idade da pedra (CAMPOS e FONSECA, 2010). A história da pelotização de minérios de ferro teve início na Suécia no ano de 1911 por A.G. Anderson, o qual detém a patente da invenção do processo de aglomeração (MOURÃO, 2017). A primeira usina piloto de pelotização, com capacidade de produção de 120 toneladas por dia, foi construída na Alemanha, após a primeira guerra mundial em 1926, e reconstruída em 1935 (CAMPOS e FONSECA, 2010). Industrialmente, a pelotização desenvolveu-se a partir da década de 1950 nos Estados Unidos da América (MOURÃO, 2017). À medida que o desenvolvimento tecnológico da mineração de minério de ferro se tornou crescente, o processo de pelotização passou a ter um papel fundamental na rota de produção do aço, pelo descobrimento de seu potencial de agregar valor na cadeia de produção, pela viabilização da lavra e beneficiamento de minérios menos compactos, friáveis e de menor teor de ferro (CAMPOS e FONSECA, 2010).

A indústria de mineração do ferro tem grande importância na economia mineral brasileira. Atualmente, o Brasil é um dos principais produtores e exportadores mundiais de minério de ferro e de pelotas de minério de ferro. As maiores jazidas estão localizadas na porção central de Minas Gerais, chamada de Quadrilátero Ferrífero. Essa região possui importantes depósitos de minério de ferro com teores acima de 46% de ferro (DEPEC, 2017).

A hematita e a magnetita são os mais importantes minerais extraídos para a produção de minérios de ferro. Os finos desses minérios de ferro, antes considerados rejeitos, passaram a ser uma das matérias-primas essenciais na formação das pelotas, que por sua vez são utilizadas na produção do aço. Essas pelotas são usadas na fabricação de ferro primário por meio de dois processos: alto-forno e a redução direta (QUARESMA, 2009).

Além de aumentarem a produtividade de altos-fornos, pelotas de minério de ferro são os principais insumos de fornos de redução direta. A formação desses pequenos aglomerados esféricos se dá por meio do rolamento da mistura de finos de minério (*pellet feed*), água e aglomerante em discos ou tambores pelotizadores. Neste estágio, as pelotas

são denominadas verdes ou cruas e necessitam ter resistência adequada que permitam seu manuseio até a fase de endurecimento, onde passam por um processo de tratamento térmico de sinterização.

O processo de pelletização pode ser considerado como relativamente simples, porém há variáveis de controle que merecem atenção especial, tais como: teor de umidade, dosagem de aglomerante e distribuição granulométrica das partículas de minério. A adição de água e a dosagem de aglomerante são os fatores que mais influenciam a formação das pelotas e, portanto, exigem controle mais rigoroso (MEYER, 1980). O teor de umidade ótimo corresponde àquele no qual todos os poros são preenchidos com água, proporcionando a formação dos aglomerados com boa qualidade. Umidade insuficiente resulta na presença de ar que reduz a formação de pontes líquidas, já uma quantidade excessiva pode transformar a mistura em lama. Para garantir a união das partículas, aglomerantes são adicionados no processo. O aglomerante mais utilizado na pelletização é a bentonita, em decorrência de sua capacidade de aumentar a resistência mecânica das pelotas e no controle do teor de umidade. Por outro lado, a bentonita diminui a taxa de crescimento das pelotas verdes e influencia os mecanismos de crescimento.

A resistência à ruptura e a plasticidade das pelotas verdes são características importantes na produtividade de uma usina de pelletização, pois estão diretamente associadas à sua probabilidade de fragmentação durante as operações de manuseio às quais essas pelotas são submetidas até a entrada do forno. Na indústria a resistência mecânica de pelotas verdes é avaliada por dois testes: o número de quedas e a resistência à compressão. O número de quedas descreve a resistência mecânica da pelota por meio de um impacto rápido, similar às quedas sofridas durante o transporte da unidade de pelletamento até a unidade de endurecimento, por exemplo, a descarga em uma correia transportadora. Já a resistência à compressão é a capacidade de resistência da pelota verde sob carregamento lento, ou seja, algo análogo ao que ocorre no leito de pelotas durante o processo de secagem. As pelotas devem ter boa resistência à compressão quando molhadas, para não se deformarem sob efeito da pressão causada por sobreposição uma com as outras, bem como boa resistência quando secas, para que não desintegram na etapa de secagem.

Os resultados dos ensaios supracitados, usados rotineiramente no controle da produção, entretanto, não permitem entender como pelotas respondem às colisões que

ocorrem desde o tambor ou disco pelletizador até o forno de endurecimento, as quais ocorrem a diferentes alturas ou velocidades de queda, ângulos e superfícies de contato. Tal entendimento seria imprescindível para que um modelo matemático da quebra de pelotas verdes venha a ser desenvolvido no futuro.

2 OBJETIVO GERAL

Estudar a resistência ao impacto e compressão de pelotas verdes individuais de minério de ferro, com vistas a fornecer subsídios para a sua modelagem matemática para prever a quebra.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Investigar a influência do tamanho da pelota, da altura de queda, da superfície de impacto e do ângulo de impacto na quebra de pelotas verdes.

Investigar a influência da velocidade de carregamento e o teor de bentonita nas características mecânicas de pelotas verdes.

Investigar o efeito residual do dano induzido a pelotas verdes após sua queima.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MINÉRIO DE FERRO E SUA IMPORTÂNCIA NA ECONOMIA BRASILEIRA

A mineração, atividade que permite extrair substâncias de valor econômico do subsolo, tem estado presente há anos em todo o mundo e se mostrado essencial no desenvolvimento da sociedade (LOPES, 2016). O Brasil é considerado um dos principais produtores siderúrgicos no mundo e ocupa o terceiro lugar no *ranking* mundial de produção de minério de ferro (USGS, 2019). Além disso, a exportação deste minério contribui diretamente para a economia do país, sendo os principais compradores China, Japão, Coreia do Sul e Holanda (LOPES, 2016).

A utilização direta do minério de ferro se dá na forma de aglomerados e granulados (*lumps*) (QUARESMA, 2001). As jazidas de minério de ferro possuem naturalmente uma parcela de finos com tamanho inferior a 6 mm, dimensão mínima aceitável para a utilização desses granulados em alto-fornos. Além disso, durante a extração (lavra), beneficiamento e transporte do minério de ferro é gerada uma quantidade excedente de partículas finas e ultrafinas, cuja destinação direta aos fornos siderúrgicos é impraticável (SILVA, 2008). De fato, os granulados com tamanhos entre 25 mm a 6 mm, são diretamente destinados aos fornos de redução. Já os minérios com granulometria ultrafina, necessitam de processos de aglomeração (QUARESMA, 2001).

A fim de melhorar a economicidade da produção de minério de ferro para as indústrias siderúrgicas e elevar a recuperação dos finos, foram desenvolvidos os processos de aglomeração. Os processos utilizados para esta finalidade são a briquetagem, a sinterização e a pelletização. A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas por meio de aplicação de pressão, utilizando ou não um aglutinante, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, porém com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados (CARVALHO e BRINCK, 2010). A matéria-prima da sinterização, o *sinter feed*, tem granulometria contida entre 6,35 mm e 0,15 mm, enquanto que a da pelletização, o *pellet feed*, possui granulometria inferior a 0,15 mm. O desenvolvimento desses processos de aglomeração tornou possível que os finos de minério de ferro, outrora considerados rejeitos na mineração, passassem a ter valor econômico na forma de pelotas, tornando a pelletização um importante segmento da

produção de minério de ferro tanto para o mercado interno como para a exportação (QUARESMA, 2001).

O minério de ferro em ambas as formas, aglomerados ou granulados, é utilizado como matéria-prima em alto-fornos para a produção de ferro-gusa e nos fornos de redução direta para a produção de ferro-esponja (QUARESMA, 2001). A ampla versatilidade e o baixo custo garantem vasta aplicação e contribui para que o aço seja a liga metálica mais utilizada pelo homem, desde pequenas peças, como engrenagens de relógios, a estruturas de grande porte, como pontes e navios.

3.2 MINERAIS DE FERRO

Um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, na proporção de 4,2%, o ferro é extraído em grande volume e considerado um recurso mineral metálico de grande importância para as indústrias siderúrgicas. Dentre todos os metais, o ferro é um dos mais abundantes e se encontra presente em diversas classes minerais, devido à sua alta capacidade de oxidação e redução dependendo do ambiente. Os principais minerais que contêm ferro são hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), siderita (FeCO_3) e pirita (FeS_2). De todos esses minerais-minérios, a hematita e a magnetita são os mais importantes e mais utilizados na siderurgia (PINHEIRO, 2000).

O aproveitamento econômico dos minérios de ferro está ligado diretamente às condições geológicas e metalogenéticas das jazidas. A mineralogia, os teores, a estrutura e a textura das rochas do mineral-minério ferro são parâmetros que influenciam no aumento da comercialização deste minério (PINHEIRO, 2000).

A hematita é considerada o mineral-minério mais abundante que contém como fonte principal o ferro. O Brasil tem grandes jazidas em Minas Gerais (Quadrilátero Ferrífero) e Pará (Serra dos Carajás), tornando o país grande produtor mundial. A hematita contém 69,9% de ferro e 30,1% de oxigênio (RODRIGUES, 2014). Dependendo das propriedades físicas, químicas e cristalográficas, a hematita pode ocorrer na forma compacta, especular, porosa, martítica e granoblástica (HENRIQUES *et al.*, 2012).

Na forma compacta, a hematita é a base de minérios de ferro de alto teor por conter características químicas e físicas especiais, como alto teor em ferro, baixo teor de sílica e

textura maciça que permitem que o minério seja usado como granulado em processos de produção de ferro por redução direta (HENRIQUES *et al.*, 2012).

A magnetita é um mineral ferromagnético e também um dos principais minerais de ferro. É formada pelos óxidos de ferro II e III, contendo 69 % de Fe_2O_3 e 31 % de FeO . Ela ocorre em pequenos grãos em rochas ígneas, metamórficas e também meteoritos (HENRIQUES, 2012).

3.3 PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO

Na década de 1950, intensificaram-se os estudos sobre processos de pelotização, invenção esta que possibilitou a utilização dos concentrados de finos de minério de ferro na forma de pelotas e estas como matéria-prima na produção de ferro gusa (FORSMO, 2007).

O estágio primário do processo de pelotamento é a formação das pelotas verdes de minério de ferro com diâmetro de 8 a 18 mm, formadas pela mistura de superfinos de minério de ferro (*pellet feed*) com elevada concentração de ferro (superior a 63 %), granulometria bem distribuída e alta porosidade (25 a 30 %); juntamente com a adição de água e outros aditivos orgânicos e inorgânicos que contribuem para qualidade e resistência das pelotas (AUGUSTO, 2012). No processo de pelotamento são usados discos ou tambores na formação dessas pelotas verdes ou cruas, assim chamadas por não terem ainda sofrido o processo térmico de endurecimento.

Segundo Silva (2017) e Yamaguchi *et al.* (2010), o processo de pelotização ilustrado na Figura 3.1, é composto pelas seguintes etapas:

- i. recebimento da matéria prima: depende da localidade da planta de pelotização, se esta for próxima à mina, o transporte pode ser feito por correias transportadoras, do contrário são utilizados minerodutos, ferrovias e/ou navios;
- ii. moagem: estágio responsável pelo ajuste da granulometria dos finos e da área específica superficial do minério de ferro. Os métodos de moagem são caracterizados quanto aos seguintes aspectos: moagem a úmido ou a seco; moagem de circuito aberto ou de circuito fechado; moagem em único estágio ou em múltiplos estágios. A combinação desses métodos pode ser utilizada

dependendo das características do minério e, principalmente, da viabilidade econômica;

- iii. filtração: se o processo anterior for moagem a úmido, o principal objetivo dessa etapa é a geração de um produto com umidade adequada para a formação das pelotas verdes, enquanto que na moagem a seco, o teor de umidade baixo requer adição de uma quantidade adequada de água para preparar o material para o pelotamento. A filtração não pode apresentar baixa eficiência, para evitar comprometimento dos estágios subsequentes, além de evitar o aumento no consumo de aditivos e desperdício de fonte de energia dos processos;
- iv. prensagem: utilizando o equipamento denominado prensa de rolos, esta unidade se encarrega do aumento da área de superfície específica. Dependendo do posicionamento da prensa no processo produtivo, pode se obter maior eficiência na moagem e maior facilidade no controle do teor de umidade;
- v. mistura: a composição química é ajustada para garantir alta qualidade das pelotas verdes. Nesta fase há uso de aditivos como calcário ou dolomita para controle da basicidade, além da adição de bentonita ou aditivos orgânicos responsáveis por aumentar a capacidade de adsorção e forças de adesão, garantindo a eficiência na formação das pelotas verdes. Podem ainda ser adicionados carvão antracito ou coque de petróleo como combustíveis sólidos para facilitar a queima das pelotas;
- vi. pelotamento: as pelotas verdes são formadas por tambores ou discos pelotizadores, os quais utilizam a força centrífuga para a formação das mesmas. Os discos são os mais utilizados industrialmente, já que as pelotas verdes produzidas pelos tambores não apresentam uniformidade no diâmetro, aumentando assim o retorno de material para o tambor. Já os discos produzem pelotas mais uniformes, pois sua operação é facilmente ajustada para variar as condições da matéria-prima, alterando a velocidade de rotação, a inclinação e a profundidade;
- vii. endurecimento: as pelotas verdes não apresentam resistência suficiente para serem transportadas por caminhões, navios ou trens e nem submetidas aos processos de redução. Então para aumentar sua resistência e promover mais forte adesão das partículas ultrafinas de minério de ferro, as pelotas verdes são levadas a um

tratamento térmico de secagem, pré-aquecimento, aquecimento, variando entre 1250 a 1350°C e resfriamento;

- viii. peneiramento: após o processo de endurecimento, as pelotas secas são classificadas com o auxílio de peneiras vibratórias, onde as pelotas quebradas ou com tamanhos inferiores a, tipicamente, 5 mm são recirculadas.

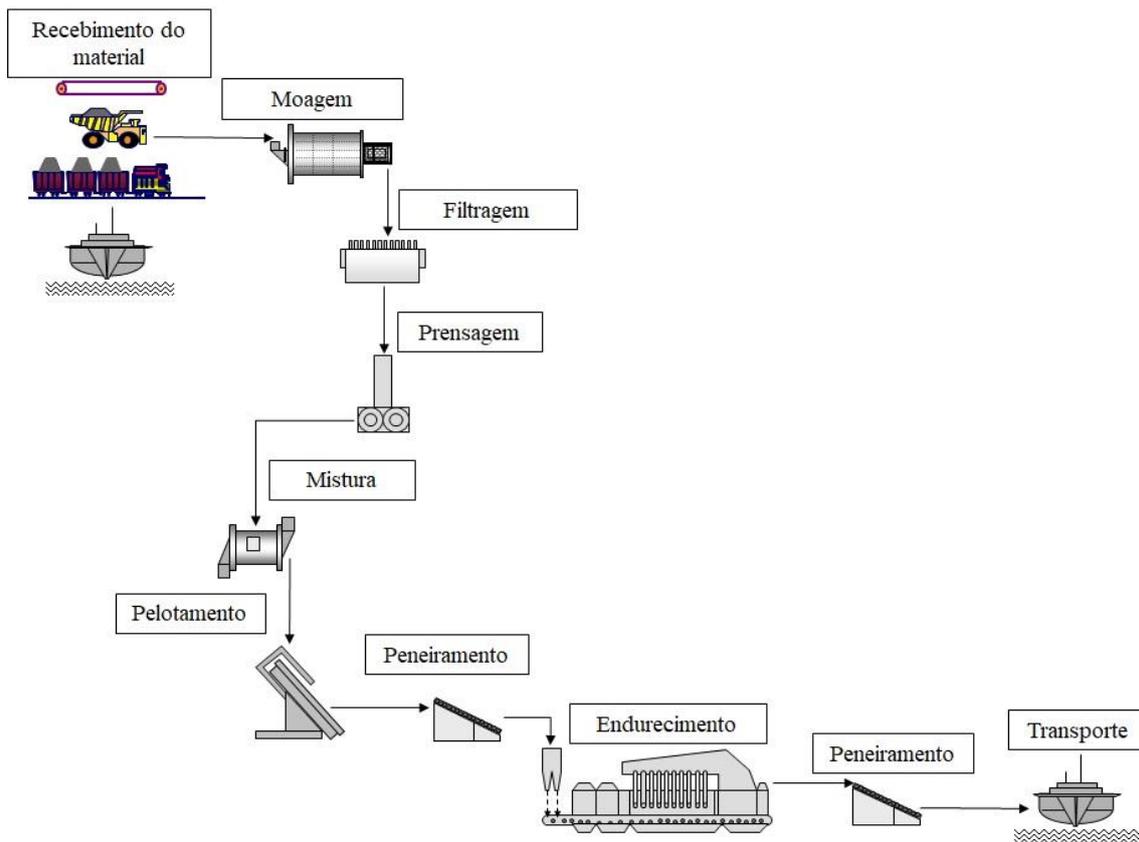


Figura 3.1 Etapas do processo de pelotamento
Fonte: adaptada de VALE S.A.

Os discos usados na etapa de pelotamento são equipamentos centrífugos (Figura 3.2) os quais possuem dispositivo para controle da rotação (4 a 8 rpm), inclinação (40 a 47°) e da alimentação. Com menor velocidade, formam-se pelotas verdes de tamanho menor (FONSECA, 2004; MEYER, 1980). A uma velocidade insuficiente, o material permanece na posição de repouso, enquanto que com uma velocidade excessiva, o material se move para cima sem deslizar devido à força centrífuga. A velocidade ideal é quando toda a carga é elevada e desce num movimento tal como o cascadeamento na

moagem e há o rolamento das partículas sobre a camada do disco ou tambor (PANDEY *et al.*, 2012).

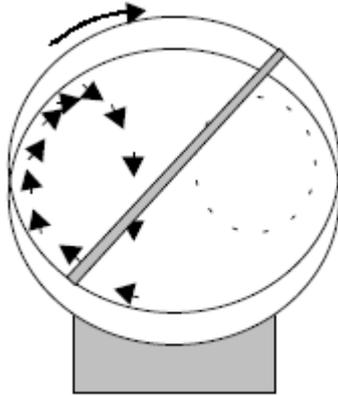


Figura 3.2 Vista frontal do disco pelotizador
Fonte: Ramaker (2001)

A inclinação do disco é determinada pelo ângulo de repouso do material. Para superar este ângulo, a inclinação do disco deve ser ligeiramente evidenciada como mostrado na Figura 3.3. Se α for o ângulo de repouso e β o ângulo de inclinação, β deve ser bem maior que α . O ângulo de inclinação não deve ser muito agudo, pois o material não seria levantado (PANDEY *et al.*, 2012). O diâmetro dos discos industriais varia de 6 a 7,6 m, além disso possuem raspadores que controlam a espessura da camada de minério que se forma no fundo do disco, prevenindo o acúmulo de material, garantindo condições adequadas de rolamento e aglomeração do minério. O ponto de alimentação no disco é vital para a formação das pelotas, podendo ser modificado de acordo com a necessidade de operação (FONSECA, 2004; MEYER, 1980).

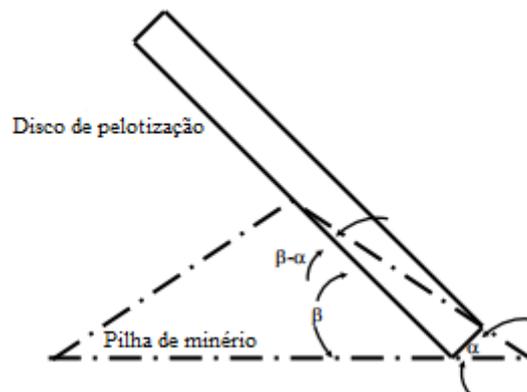


Figura 3.3 Orientação do disco pelotizador
Fonte: adaptado de Pandey *et al.* (2012)

A classificação das pelotas quanto ao diâmetro é realizada em função da disposição e forma de operação do disco, por meio da combinação da força centrífuga e do próprio peso das pelotas formadas. A mistura é introduzida pontualmente em uma posição do disco e as pelotas primariamente formadas sofrem rolamentos sucessivos sobre as partículas finas alimentadas, ocasionando o aumento gradativo do diâmetro das pelotas (FONSECA, 2004). Segundo Pandey *et al.* (2012) a formação das pelotas nos discos de pelotamento depende principalmente da natureza das matérias-primas, da taxa de alimentação, da posição de alimentação, da altura do raspador, da velocidade de rotação do disco, da posição dos raspadores, da inclinação do disco, da vazão de água adicionada e do tempo de residência. Meyer (1980) destaca que a variável que apresenta maior influência e que pode ser controlada no disco de pelotamento é o tempo de residência do material dentro do disco.

O último estágio é o processo de endurecimento, que consiste na secagem e atribuição das características típicas das pelotas de minério de ferro (MEYER, 1980). O sucesso na obtenção das pelotas depende da eficiência e harmonia entre os estágios do processo de pelotização, porém a etapa mais importante é a formação das pelotas verdes. Durante sua formação atuam vários mecanismos de aglomeração, onde a cinética e os parâmetros influenciam diretamente no processo.

3.4 FORMAÇÃO DAS PELOTAS VERDES

Para entender e quantificar o processo de formação de pelotas é indispensável um conhecimento detalhado sobre os mecanismos que envolvem o crescimento desses grânulos. As forças que contribuem para a formação das pelotas a partir de partículas sólidas podem ser classificadas como naturais ou físicas, aplicadas ou mecânicas. Quando a aglomeração se dá por ação natural, ocorrem entre as partículas interações instantâneas do tipo Van der Waals, forças magnéticas associadas à natureza paramagnética ou ferromagnética do material ou forças eletrostáticas resultantes das cargas encontradas na superfície do minério, devido à quebra das ligações químicas. Essas interações dependem da forma, tamanho e estrutura cristalina das partículas e são conhecidas como forças atrativas. Sabe-se ainda que, para a formação das pelotas, a presença de uma fase líquida é essencial, então forças interfaciais e capilares resultam em forças físicas que mantêm as partículas juntas (SASTRY e FUERSTENAU, 1973).

Estas forças interfaciais que surgem através da combinação entre o sólido, o ar e o líquido aglutinante, usualmente a água, têm efeito coesivo. Por outro lado, as forças capilares advêm de pontes líquidas que atuam de várias maneiras para manter as partículas de minério unidas. A força dessas pontes é resultante da pressão capilar devido à curvatura e à tensão interfacial das partículas de minério (MEYER, 1980). Além disso, como mostra a Figura 3.4, podem haver pontes sólidas, formadas após o endurecimento de aditivos (ligantes, adesivos, aglomerantes ou *binders*) presentes no líquido ou na mistura de pós, o que é importante durante a pelletização, e também a interligação de partículas devido à variação das suas formas: cristais, arredondadas ou alongadas (RAMAKER, 2001).

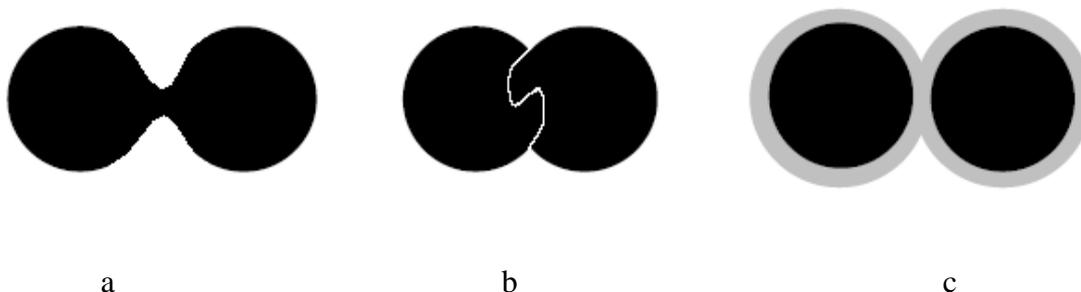


Figura 3.4 Forças interparticulares do processo de pelletização a) pontes sólidas b) interligação de partículas c) pontes líquidas

Fonte: Ramaker (2001)

3.4.1 Formação das pontes líquidas

Para formar os aglomerados úmidos, a água atua como aglutinante e o número de estágios diferentes durante a formação desses aglomerados depende da quantidade de aglutinante presente (FORSMO, 2007). Newitt e Conway-Jones (1958) foram os pioneiros no estudo dos diferentes estágios (Figura 3.5) das pontes líquidas em um grânulo como pendular, funicular, capilar e a fase de gotícula (RAMAKER, 2001).

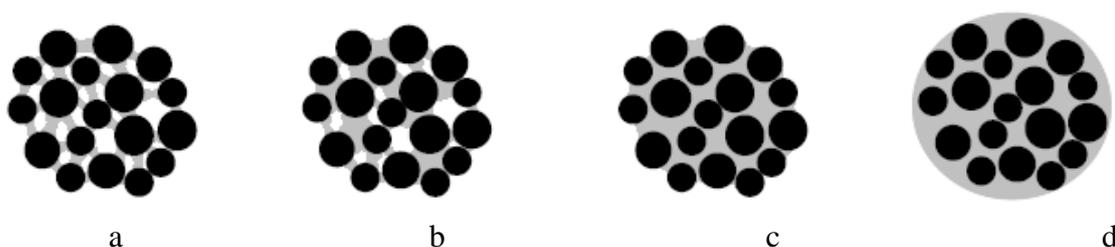


Figura 3.5 Diferentes estágios das ligações líquidas em grânulos: a) pendular b) funicular c) capilar e d) fase da gotícula

Fonte: Ramaker (2001)

Quando não há presença de líquido aglutinante e a consequente ausência de formação das pontes líquidas, somente ocorre a presença de pequenos agregados resultantes de forças atrativas do tipo Van der Waals. No estágio pendular, há pouca quantidade de líquido e as partículas são mantidas aderidas por meio de pontes líquidas presentes em alguns pontos de contato individual entre as partículas. À medida que a quantidade de líquido aumenta, mais pontes líquidas são formadas unindo mais de duas partículas, estágio este chamado de funicular. Além das pontes líquidas, há presença de vazios entre elas, os quais são parcialmente saturados com líquido. O estágio capilar é marcado pela saturação total dos vazios com o líquido aglutinante, o que caracteriza a formação de um grânulo mais resistente (RAMAKER, 2001). A resistência do grânulo tem um aumento de três vezes quando passa do estágio pendular para o capilar (BERNARDES, 2006). Por ação capilar, o líquido é eliminado dos poros da superfície, e no interior do grânulo, as partículas estão totalmente envoltas pelo líquido. Caso mais líquido seja adicionado, o grânulo se transforma em um sistema com partículas suspensas no líquido e sua resistência diminui, dando início ao estágio conhecido como gotícula (RAMAKER, 2001). O grau de enchimento ou a saturação desse líquido aglutinante que descreve o volume de poros, pode ser mensurado por meio da Equação 3.1:

$$S = \frac{100F}{100-F} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho_P}{\rho_L} \quad (3.1)$$

na qual S é o grau de enchimento do líquido, F é o teor de umidade em base úmida, ε é a fração da porosidade, ρ_P é a densidade da partícula e ρ_L é a densidade do líquido (FORSMO, 2007).

Segundo a teoria capilar, quando S é igual a 100%, ocorre a inundação, ou seja, o aglomerado se deforma sob seu peso. À medida que o aglomerado é lentamente seco, a principal força de ligação que atua é a força capilar, enquanto que parte dos capilares ainda estão sendo preenchidas com água, aproximadamente S é igual a 30%. A ligação por pontes líquidas controla a resistência, e a resistência do aglomerado com pontes líquidas completamente desenvolvidas (S é igual a 30%) representa cerca de 35% da resistência máxima. A resistência do aglomerado úmido no ponto máximo, ou seja, no estado capilar é dada pela Equação 3.2 (FORSMO *et al.*, 2006):

$$\sigma_c = a \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \gamma \cdot \frac{1}{d} \cdot \cos \theta \quad (3.2)$$

na qual σ_c é a força de tração em pelotas verdes úmidas devido às forças capilares; a é uma constante; ε é a porosidade fracionária; γ é a tensão superficial; d é o tamanho médio da partícula e θ é o ângulo de contato.

As pontes líquidas são as principais responsáveis por manterem as partículas unidas por meio da combinação das forças capilares e viscosas, marcando o início da formação do grânulo e seu crescimento.

3.4.2 Mecanismos de crescimento dos grânulos

Nucleação, coalescência, transferência por abrasão, ruptura e formação de camadas, ilustrados pela Figura 3.6, são os mecanismos envolvidos na formação e crescimento dos grânulos em processos de granulação (SASTRY e FUSTERNAU, 1973).

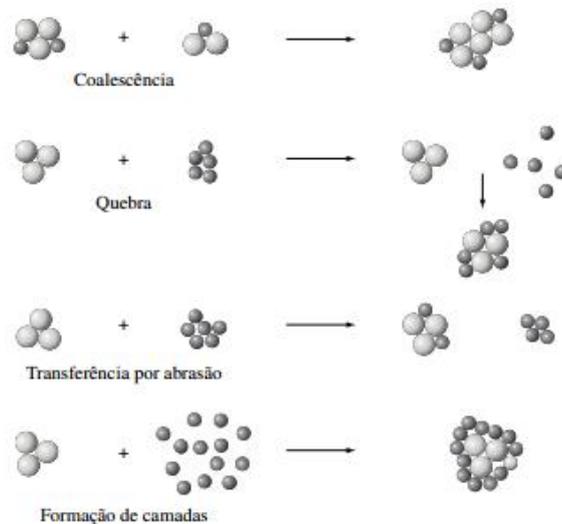


Figura 3.6 Mecanismos de crescimento dos grânulos
 Fonte: Bernardes (2006)

As características dos grânulos dependem da formulação, ou seja, da escolha do *pellet feed* alimentado, das propriedades líquidas, do tipo de equipamento granulador e do ajuste dos seus parâmetros operacionais. Não há uma metodologia ideal para operação dos circuitos de granulação, sendo difícil prever o seu comportamento (IVESON e LITSTER, 1998).

O primeiro estágio de crescimento dos grânulos é a nucleação, no qual as partículas de pó se juntam, dando origem aos núcleos ou sementes, após o primeiro contato com o líquido aglutinante, ou seja, a formação das pontes líquidas de natureza pendular. A nucleação também pode ocorrer por meio da absorção das partículas em uma gota do líquido (RAMAKER, 2001).

Quando os núcleos colidem uns contra os outros aleatoriamente, formam um grânulo maior. Mesmo se houver deformação superficial, este mecanismo é denominado coalescência. Também chamado como bola de neve, o mecanismo de formação de camadas é resultante da junção de partículas primárias, material alimentado não granulado, à superfície de um grânulo maior, devido à formação de pontes capilares, aumentando ainda mais o seu tamanho. O que difere os mecanismos de coalescência e formação de camadas são os tamanhos das suas partículas iniciais (RAMAKER, 2001).

A ruptura dos grânulos se dá por diferentes mecanismos: primeiramente os grânulos menores sofrem esmagamento, sendo posteriormente aderidos às superfícies dos grânulos maiores em camadas. Esse esmagamento pode ocorrer por quebra, fragmentação

ou abrasão (RAMAKER, 2001). Quando ocorre por abrasão, se trata de um tipo de mecanismo de ruptura conhecido como transferência por abrasão, onde ocorre a transferência de materiais de um grânulo para outro. Vale ressaltar que esta fase não altera o número total ou a massa das partículas. No entanto, as partículas sofrem alteração no seu tamanho, caso estejam em condições favoráveis a isso (SUSHMA *et al.*, 2014).

O processo de crescimento de grânulos tem sido tradicionalmente descrito por esses diferentes mecanismos. Iveson *et al.* (2001) aborda que essa quantidade de mecanismos passa uma ideia de concorrência entre eles. Além disso, o que caracteriza cada tipo de mecanismo é o tamanho do grânulo gerado e se o material se encontra granulado ou não. Foi então sugerida a predominância dos mecanismos de coalescência e ruptura, pois o que varia é a quantidade de líquido disponível superficialmente e o tamanho das partículas. A Figura 3.7 apresenta a abordagem moderna do processo de granulação resultante da combinação de apenas três mecanismos:

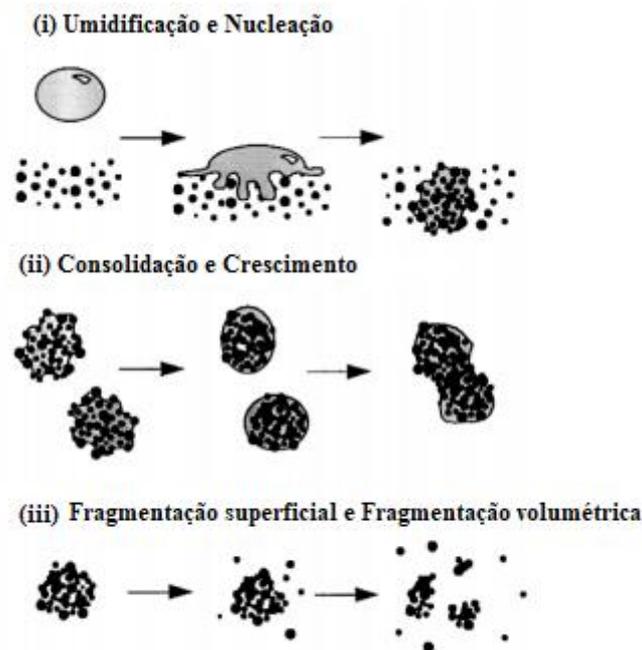


Figura 3.7 Abordagem moderna dos mecanismos de crescimento dos grânulos

Fonte: adaptado de Iveson *et al.* (2001)

- i. umidificação e nucleação: o líquido pulverizado entra em contato com o minério alimentado, sendo necessária uma distribuição uniforme, dando início à formação dos núcleos iniciais dos grânulos. A área em que ocorre este contato é denominada zona de nucleação, onde a formação dos núcleos é função da termodinâmica e da

cinética dos agentes molhantes. O tamanho e a distribuição desses núcleos dependem dos fenômenos que ocorrem na zona de nucleação, além da mistura eficaz do pó e do líquido aglutinante que é função das variáveis de processo;

- ii. consolidação e crescimento: é o estágio quando ocorrem colisões dos grânulos entre si, dos grânulos com o equipamento granulador e dos grânulos com o pó alimentado. Essas colisões reduzem os tamanhos dos grânulos e a porosidade, expulsando o ar aprisionado. A porosidade é responsável pelo controle da resistência do grânulo: uma alta porosidade implica em grânulos fracos e friáveis, os quais são indesejáveis na maioria dos casos. Outrora, a consolidação é responsável pelo aumento da saturação dos poros, ocasionando um aumento na disponibilidade do líquido na superfície do grânulo e em sua plasticidade, favorecendo o mecanismo de coalescência;
- iii. fragmentação superficial e volumétrica: devido aos impactos, compactação ou desgaste no granulador, os grânulos úmidos se quebram. A ruptura desses grânulos afeta o controle da distribuição final do tamanho dos grânulos.

Segundo Kapur e Fuersternau (2003), a cinética de crescimento dos grânulos pode ser descrita por uma curva em forma de S, a qual mostra três regiões distintas de crescimento: formação do núcleo inicial, transição e região de crescimento das pelotas ou grânulos. Essas regiões dependem intrinsecamente do teor de umidade na alimentação, da distribuição granulométrica do minério alimentado, do método de preparação desse minério e da dosagem de aditivos. Para aumentar a resistência dos grânulos, aditivos são comumente adicionados no processo de pelletização (SASTRY, 1995).

3.5 MATÉRIAS-PRIMAS E VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE PELOTAMENTO

No processo de pelletização há dois grupos diferentes de matérias-primas. Um deles são os minerais-minérios ricos em ferro, o outro grupo é composto pelos aglomerantes e aditivos que atribuirão características durante a formação das pelotas e aumentarão a capacidade de molhamento, secagem e queima das pelotas de minério de ferro. Todos os componentes para a formação das pelotas (*pellet feed* e aditivos) devem ser intensivamente misturados. Além disso a dosagem de componentes e o tempo de mistura necessitam de um controle preciso.

A variação das propriedades e a natureza dos minérios dificultam na predição da qualidade final das pelotas, portanto é indispensável ter instrumentos que compensem estas variações. Os fatores do primeiro grupo são dependentes da matéria-prima e não são variáveis. Consistem principalmente da natureza do minério, ou seja, se o mineral predominante é hematita, magnetita ou outros tipos e da forma cristalina em que se encontram. As características físicas dos finos de minério de ferro também influenciam na formação das pelotas, tais como tamanho e faixa granulométrica das partículas, a forma das partículas, o tipo de superfície, a porosidade e os tipos de poros. Os concentrados desses minérios necessitam estar suficientemente finos para a formação das pelotas (MEYER, 1980).

Já o segundo grupo não depende das propriedades da matéria-prima e corrige os fatores negativos do primeiro grupo, contribuindo para a formação uniforme e de boa qualidade das pelotas. Estes fatores agem em combinação uns com os outros e influenciam na formação das pelotas verdes ou no estágio de queima (MEYER, 1980). De acordo com Meyer (1980), os aglomerantes e aditivos são adicionados para adequar a composição química e a estrutura física das pelotas, tais como:

- i. Bentonita: mistura de argilas utilizada como aglomerante devido à sua capacidade de absorção de água;
- ii. Compostos de cal: rochas sedimentares com mais de 30% de carbonato de cálcio como o calcário (CaCO_3); o hidróxido de cálcio ou cal hidratada (Ca(OH)_2) e a dolomita, mineral de carbonato de cálcio e magnésio ($(\text{Ca, Mg})\text{CO}_3$) são aditivos que atuam diretamente no processo de endurecimento da pelota, a presença do óxido de cálcio (CaO) na escória favorece o endurecimento devido à forte ligação entre os grãos de minério, já o óxido de magnésio (MgO) contribui para o aumento da resistência mecânica, aprimorando as propriedades metalúrgicas no processo de redução;
- iii. Combustível sólido: coque de petróleo, antracito e carvão mineral, responsáveis pela atribuição de energia térmica extra para diminuir o consumo de gás e óleo durante a queima das pelotas, além de proporcionar uma distribuição uniforme do calor de reações durante o processo de tratamento térmico das pelotas.

Dentre as principais variáveis controladas, destacam-se a umidade, a distribuição granulométrica e a superfície específica das partículas de minério; e a influência dos aglomerantes, pois para muitos minérios, a adição de aglomerantes é essencial para garantir resistência às pelotas verdes. Além disso, a combinação dessas variáveis afeta o comportamento e a formação dessas pelotas nos discos como estudado em vários trabalhos.

3.5.1 Umidade

O nível de umidade está relacionado com a operacionalidade do sistema de moagem e na preparação dos finos de minério. Se o minério provém de moagem à seco, ele estará na forma de um aglomerado seco; porém a maioria dos processos industriais trabalham com moagem à úmido, resultando em uma polpa. O minério moído deve ser desaguado antes do processo de pelotização, porém a umidade em base úmida para a formação das pelotas é em torno de 8,5 a 10% (MEYER, 1980).

Para a formação adequada das pelotas verdes, o efeito da adição de água é muito importante, pois ao verificar a plasticidade das pelotas verdes, define-se o teor de umidade. Este teor ótimo depende em grande parte da distribuição granulométrica das partículas que alimentam o processo de pelotização. Além disso, pode ser desejado um mínimo de pulverização de água no equipamento pelotizador capaz de formar as pelotas com qualidade sem que a mistura se torne lama.

Nos discos, a nucleação, estágio inicial de formação das pelotas, ocorre próxima à região de alimentação. Por esse motivo, o teor de umidade é um parâmetro importante deste estágio, sendo a pulverização de água posicionada estrategicamente na área de alimentação, proporcionando a formação das sementes (SILVA, 2017). Segundo Schrader (1995), as relações entre o ângulo de contato e as forças atuantes entre a água e o sólido podem ser expressas pela Equação 3.3, a qual relaciona as tensões superficiais do sólido, o líquido, o ângulo de contato e a interface sólida:

$$\gamma_s - \gamma_{sl} = \gamma_l \cos \theta \quad (3.3)$$

na qual γ_s é a tensão superficial do sólido, γ_{sl} é a interface sólido-líquido, γ_l é a tensão superficial do líquido e θ é o ângulo de contato. O líquido entra em contato com o sólido, onde a tangente da superfície do sólido e este líquido determina o ângulo de contato

(Figura 3.8). Líquidos com ângulos de contato baixo espalham-se sobre a superfície do sólido, molhando-a; já os ângulos de contato alto levam o líquido a formar grânulos (CASEY, 2016).

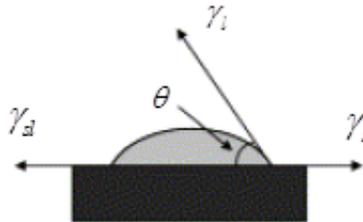


Figura 3.8 Ângulo de contato de uma gota de líquido com a superfície sólida
Fonte: adaptado de Casey (2016)

A fim de controlar o processo de pelotamento é importante ter controle da umidade presente na alimentação (CASEY, 2016). Se o teor de umidade adicionado for inferior à quantidade crítica, a distribuição não será uniforme, sendo maior no material já granuloso e deixando o material ainda seco e particulado no disco. Se a umidade adicionada no pelotamento é maior que a quantidade crítica, a taxa de crescimento das pelotas aumenta, mas estão sujeitas à deformação devido à plasticidade (PANDEY *et al.*, 2012). O aumento do teor de umidade do *pellet feed* resulta no aumento do tamanho médio das pelotas verdes, pois o aumento da umidade substitui o ar no sistema ar-sólido-líquido e fornece mais pontos de contato entre as fases sólido-sólido e sólido-líquido. Assim, a umidade deve ser otimizada para que o efeito da colisão das pelotas com as paredes do disco e com elas mesmas seja menos relevante que as propriedades visco-elásticas das pelotas verdes (PANDEY *et al.*, 2012).

3.5.2 Distribuição granulométrica e superfície específica

A resistência das pelotas verdes ou queimadas pode ser afetada pela distribuição granulométrica das partículas do minério. Para formação das pelotas o valor ideal utilizado como critério de finura dos grãos segundo Meyer (1980) são frações inferiores a 45 μm . Quando as partículas são muito finas, é necessário um tempo de residência maior no equipamento pelotizador, pois essas partículas ocupam os poros, tornando as pelotas mais densas. A taxa de crescimento das pelotas verdes é reduzida, pois ocorre diminuição

dos vazios intersticiais entre as partículas sólidas e também da formação de pontes capilares (FONSECA, 2004).

Forsmo (2007) estudou a influência do teor de umidade na plasticidade das pelotas de minério de ferro. Ele concluiu que, quanto mais fino o *pellet feed*, maior o teor de umidade necessário para conferir plasticidade nas pelotas verdes.

Outra variável importante na produção do *pellet feed* é a superfície específica das partículas do concentrado do minério de ferro. A superfície específica é definida pela área superficial de uma unidade de peso de *pellet feed* moído, estando estreitamente relacionada à proporção de finos na faixa inferior a 5 μm . É expressa pela razão da superfície pelo peso ou em volume em cm^2/g ou cm^2/cm^3 . O aumento da superfície específica implica no aumento da energia superficial da população de partículas, favorecendo o processo de pelotização (MEYER, 1980; SCHNEIDER e NEUMANN, 2002).

Rodrigues *et al.* (2014) utilizaram três tipos distintos de *pellet feed* (A, B e C) a fim de realizar um estudo comparativo entre eles. A superfície específica, o volume de poros e o diâmetro dos poros foram determinados para os três tipos de amostra como descrito na Tabela 3.1.

Tabela 3-1. Resultados dos parâmetros avaliados para as amostras de *pellet feed* A, B e C

Amostra	Volume de poros (cm^3/g) $\times 10^{-3}$	Diâmetro médio dos poros (\AA)	Área superficial específica (m^2/g)
A	1,98	36,7	2,16
B	2,03	35,1	2,23
C	16,22	42,4	15,29

Fonte: Rodrigues *et al.* (2014)

Rodrigues *et al.* (2014) notaram que o *pellet feed* C apresentou maior volume de poros e área de superfície específica mais alta em comparação aos *pellet feeds* A e B, comprovando que quanto maior a área superficial específica, maior o volume de poros. Quanto à distribuição de tamanho de partículas, o maior tamanho médio de partículas implica em uma área de superfície específica menor e vice-versa.

3.5.3 Aglomerantes

Como sabido, o processo de aglomeração combina partículas pequenas em agregados maiores. Durante a pelletização, partículas concentradas do minério de ferro úmidas são envoltas em forma de pelotas com o auxílio de aglomerantes. Os ligantes, tipicamente bentonita ou material orgânico, segundo Halt e Kawatra (2013), são aglomerantes responsáveis por manterem as pelotas unidas e facilitarem o processo de pelletização. Nas pelotas verdes, os ligantes interagem com a água e as partículas de minério por meio de forças capilares e viscosas, e são utilizados principalmente pelas seguintes razões:

- i. ajudam no controle do transporte da umidade durante o processo de pelletização, pois os ligantes aumentam a viscosidade do líquido no interior das pelotas e diminuem o transporte deste líquido do interior para a superfície das pelotas verdes. Esta ação controla a taxa de crescimento das pelotas verdes que é dependente da umidade livre encontrada na superfície das pelotas.
- ii. controlam o excesso de umidade do *pellet feed*. O processo de pelletização depende estritamente do teor de umidade na alimentação. Por exemplo, nas usinas industriais são estabelecidas restrições sobre os níveis de umidade do material enviado aos discos de pelletização. Uma umidade relativamente baixa implica em má formação de sementes nucleadas afetando o crescimento. Por outro lado, uma alta umidade permite rápida, mas incontrolável, coalescência, resultando em pelotas maiores e com aspecto altamente plástico (Figura 3.9), podendo transformar o material aglomerado em lama.

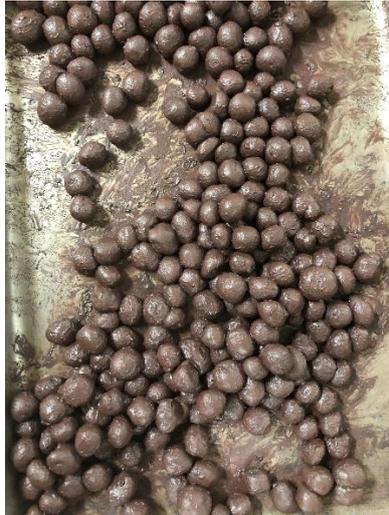


Figura 3.9 Pelotas na faixa de 10-12,5 mm com alto teor de umidade (9,3%)

- iii. no processo de secagem, o aglomerante é responsável por manter as partículas das pelotas unidas enquanto a água é removida, além de conservar a integridade até as pelotas estarem suficientemente aquecidas e dar início ao processo de endurecimento (EISELE e KAWATRA, 2003)

A escolha e o uso de um aglomerante são determinados pela forma como ele desempenha essas funções, porém evitando que ocorra problemas como contaminação e no processo de endurecimento. Vários materiais são considerados como aglomerantes de minério de ferro por produzirem um produto final de qualidade alta e baixo custo. Dentre eles citam-se argilas e minerais coloidais, polímeros e fibras orgânicas, cimentos e materiais cimentícios, sais e precipitados e polímeros orgânicos. As argilas, por exemplo, para um bom desempenho em uma usina de pelotização necessitam de um alto grau de dispersão no concentrado de minério e uma alta capacidade de absorção de umidade. A bentonita é o tipo de argila que possui essas propriedades em maior relevância (EISELE e KAWATRA, 2003).

3.5.3.1 Bentonita

A bentonita é uma mistura de minerais de argila, cujo principal componente é a montmorilonita $((Al_2, Mg_3) (Si_4O_{10})(OH)_2.nH_2O)$. O arranjo cristalino da montmorilonita está organizado em camadas, as quais são capazes de reter grandes quantidades de água. Devido a isso, a bentonita é considerada o aglomerante mais usado industrialmente na pelotização de minério de ferro por sua capacidade de inchar na presença de água. A

expansão dos minerais de argila na bentonita, segundo Eisele e Kawatra (2003), tem os seguintes efeitos:

- iv. primeiramente, a bentonita absorve água, ação que controla a umidade das pelotas verdes já formadas dentro do disco. Além disso, garante plasticidade às pelotas devido ao aumento da viscosidade entre as partículas minerais, o que facilita o dimensionamento e transporte das pelotas na indústria;
- v. a bentonita expandida se espalha bem ao se misturar com o minério de ferro. No processo de secagem, a resistência das pelotas é devido à adesão das argilas às partículas minerais e das partículas minerais entre si, como mostra a Figura 3.10. Esta é, sem dúvida, uma função importante do efeito da utilização do aglomerante na pelletização, pois na ausência de um aglomerante a pelota seca se desintegra;

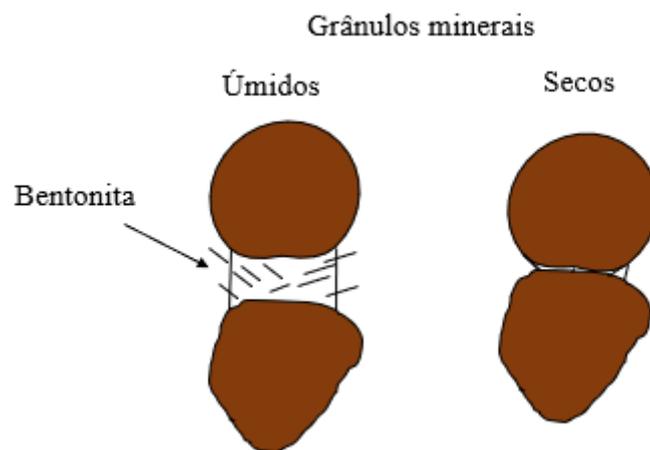


Figura 3.10 Adesão das argilas presentes na bentonita às partículas minerais
Fonte: adaptado de Eisele e Kawatra (2003)

- vi. durante o processo de pelletização, a bentonita aumenta a taxa de crescimento das pelotas verdes em comparação às pelotas sem o uso do aglomerante, como pode ser visto na Figura 3.11. A bentonita garante a formação de um aglomerado com textura superficial suave e uniforme;

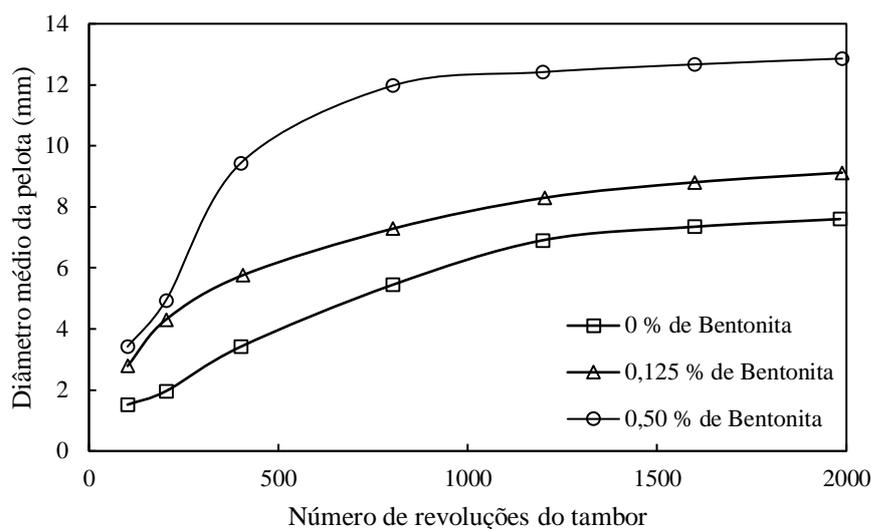


Figura 3.11 Efeito da bentonita na cinética de crescimento das pelotas
 Fonte: adaptado de Eisele e Kawatra (2013)

- vii. no processo de secagem, a bentonita aumenta a taxa de secagem, pois fornece uma via para que a umidade seja removida (GUL *et al.*, 2014).

A dosagem de bentonita também pode afetar as propriedades da formação. Abouzeid e Seddik (1980) fizeram um estudo sobre a dosagem de bentonita em três diferentes amostras de um minério de ferro do Egito basicamente compostos por magnetita, goethita, hematita e óxidos hidratados. O primeiro tipo, minério de ferro Eastern Desert (Costa do Mar Vermelho), não continha argilas ou materiais argilosos em sua composição mineralógica, enquanto que o minério de ferro Aswan possuía uma grande quantidade de minerais de argila e, por fim, o minério de ferro Baharia, que continha alguns minerais argilosos em sua composição. A variação no conteúdo de argila entre os minérios reflete na taxa de crescimento das pelotas em função da quantidade de bentonita adicionada.

A taxa de crescimento das pelotas preparadas a partir do minério de ferro de Aswan com alto teor de argila foi ligeiramente afetada pela adição de bentonita. Já o minério de Eastern Desert, que não continha argilas, sofreu forte influência da quantidade de bentonita adicionada. A taxa de crescimento das pelotas do minério de ferro Baharia se apresentou entre esses dois extremos, reforçando a observação que quando o teor de argila do minério é alto, a bentonita adicionada torna-se menos efetiva na absorção de

água da alimentação, como pode ser observado na Figura 3.12 (ABOUZEID e SEDDIK, 1980).

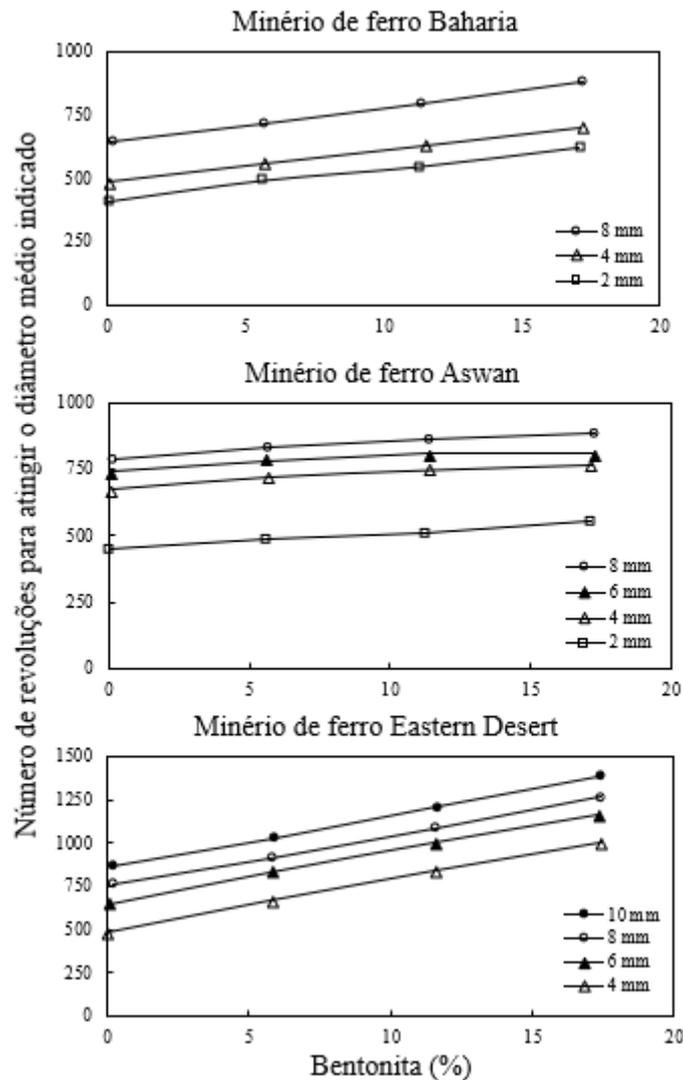


Figura 3.12 Número de revoluções do tambor necessário para produzir pelotas com um diâmetro médio conhecido em função da quantidade de bentonita adicionada

Fonte: adaptado de Abouzeid e Kawatra (2003)

A Bentonita é o principal aglomerante utilizado mundialmente. A disponibilidade e reservas no Brasil são limitadas, porém a oferta no mercado mundial é considerável. Embora seja considerada um excelente aglomerante, tem o inconveniente de adicionar às pelotas uma quantidade significativa de óxidos ácidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), como sílica e alumina e, em menor proporção, alguns compostos nocivos à qualidade da pelota, como Na_2O e K_2O . Por esta razão, há uma limitação de aplicação na produção de pelotas para

redução direta, que exige altos teores de ferro e baixíssimo conteúdo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (MOURÃO, 2017).

3.6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PELOTAS VERDES

A manipulação das pelotas verdes em uma usina industrial deve ser cuidadosamente efetuada, uma vez que elas não podem ser armazenadas durante o transporte desde a unidade de pelotamento até a unidade de endurecimento, devido à sua baixa resistência mecânica. Contudo, as indústrias em geral desenvolveram pequenas rotas de transporte com o menor número de pontos de transferência e as menores alturas de queda a fim de minimizar a degradação das pelotas até o forno de endurecimento (MEYER, 1980).

Rotineiramente, a qualidade das pelotas verdes é avaliada por meio de testes de resistência mecânica, baseados na norma ISO 4700, tais como número de queda (*drop test*) e força de esmagamento. O teste de número de queda tem o objetivo de avaliar a capacidade das pelotas verdes em resistir às quedas encontradas nos pontos de transferência durante o manuseio dentro da usina. Cerca de 20 pelotas verdes na faixa de tamanho entre 10 e 12,5 mm são soltas, uma a uma, de uma altura de 46 cm em uma superfície plana de aço até que elas apresentem fissuras ou quebrem. O número de quedas que as pelotas verdes sobrevivem sem dano é registrado como resistência de impacto úmido ou simplesmente número de queda. Já o teste de esmagamento representa a resistência das pelotas verdes à compressão lenta. Usando uma prensa hidráulica, cada pelota é comprimida, com velocidade variando entre 10 a 20 mm/min, entre duas superfícies planas de metal até que a fratura e a carga máxima na ruptura sejam registradas. Este mesmo teste é utilizado para avaliar a qualidade de pelotas secas. Essas devem ser submetidas a uma temperatura de 105 °C por 1 hora garantindo que estejam completamente secas para posterior inicialização do teste (SRIVASTAVA *et al.*, 2013).

Meyer (1980) especifica que uma pelota de boa qualidade, tanto verde quanto seca, deve ter a resistência à compressão de acordo com a Tabela 3.2. Ela mostra que, no caso da pelota verde, o número de quedas que uma pelota com 12 mm de diâmetro resiste deve ser no mínimo 4.

Tabela 3-2. Resistência à compressão para pelotas verdes e secas nos tamanhos de 10, 12 e 15 mm

Força da ruptura (N)	Tamanho de pelota (mm)		
	10	12	15
Pelotas verdes	8,0	9,3	11,1
Pelotas secas	33,6	39,0	40,6

Fonte: Meyer (1980)

A avaliação do número de quedas que uma pelota suporta é usado como um indicador se as pelotas foram formadas com boa qualidade e se são resistentes o suficiente para suportar o manuseio até a etapa de queima. Já a força de compressão é importante parâmetro avaliativo do efeito do aglomerante na resistência da pelota (SRIVASTAVA *et al.*, 2013).

O número de quedas é considerado o parâmetro mais importante até mesmo comparado à resistência à compressão no controle da sobrevivência das pelotas verdes. Conforme será demonstrado a seguir, o número de queda varia fortemente tanto em função do teor de umidade quanto da dosagem de bentonita. Uma certa quantidade de deformação elástica é necessária para que as pelotas resistam durante o transporte na usina, então aceita-se quatro como o número de queda mínimo, o qual depende do circuito de manuseio, enquanto normalmente o número de queda é maior que seis (FORSMO *et al.*, 2006).

As pelotas verdes têm comportamento plástico e elástico. A deformação plástica, segundo Sportel *et al.* (1997) apud FORSMO *et al.* (2006), está ligada à quantidade de umidade e bentonita adicionada, pois à medida que a dosagem de bentonita aumenta, o teor de umidade também sofre um aumento considerável. Já a elasticidade está definida por Forsmo *et al.* (2006) como a integridade das pelotas verdes durante o manuseio dentro da usina. Espera-se também que as pelotas recém-formadas apresentem uma boa resistência ao sair do equipamento pelletizador.

Vários trabalhos têm avaliado a qualidade das pelotas verdes por meio de ensaios de resistência mecânica influenciados por variáveis como distribuição granulométrica das partículas, teor de umidade e dosagem de aglomerante, ou pela combinação de várias delas. Srivastava *et al.* (2013) compararam em seu estudo a resistência das pelotas com e sem o uso do aglomerante bentonita. Quando as pelotas foram produzidas com o uso do

aglomerante, o número de queda foi muito superior em comparação com as pelotas sem o uso do aglomerante.

Forsmo *et al.* (2006) realizaram um estudo sobre a variação na plasticidade e resistência das pelotas verdes de magnetita com diferentes dosagens de bentonita e chegaram à conclusão que a resistência das pelotas verdes à compressão é pouco influenciada pelo teor de umidade e fortemente influenciada pela dosagem de bentonita, como mostra a Figura 3.13.

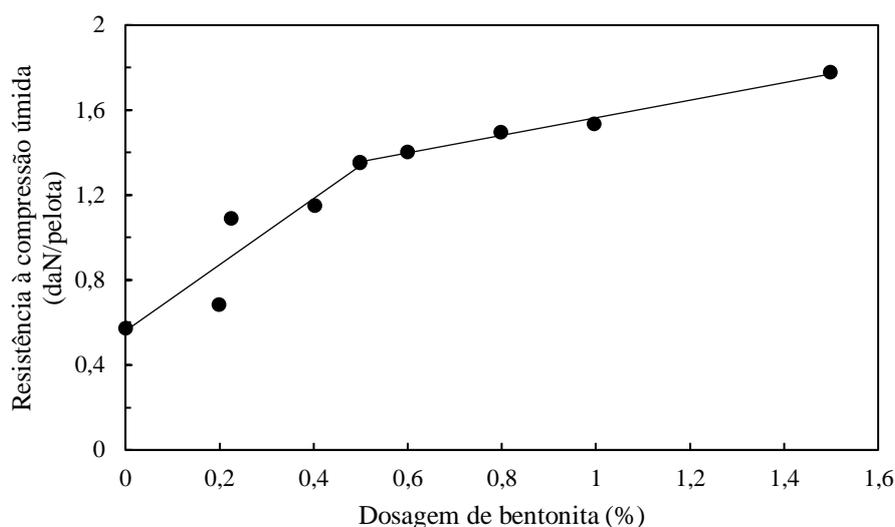


Figura 3.13 Resistência à compressão em relação à dosagem de bentonita
Fonte: adaptado de Forsmo *et al.* (2006)

Com base na análise gráfica, Forsmo *et al.* (2006) identificaram dois intervalos distintos na Figura 3.13. Em baixas dosagens de bentonita a força de ligação atuante é a combinação da força capilar, água como líquido com mobilidade livre, e a força coesiva, resultante da adição do aglomerante viscoso. À medida que a dosagem de bentonita se aproxima de 0,5%, a força de ligação que predomina é a do aglomerante. Em seguida, quando a dosagem de bentonita aumenta, a força de coesão aumenta, porém, a adesão de água na superfície das partículas se torna fraca, controlando a quebra das pelotas verdes. Quando o comportamento viscoso é alcançado, a altas dosagens de bentonita, a elasticidade aumenta, como pode ser visto na Figura 3.14.

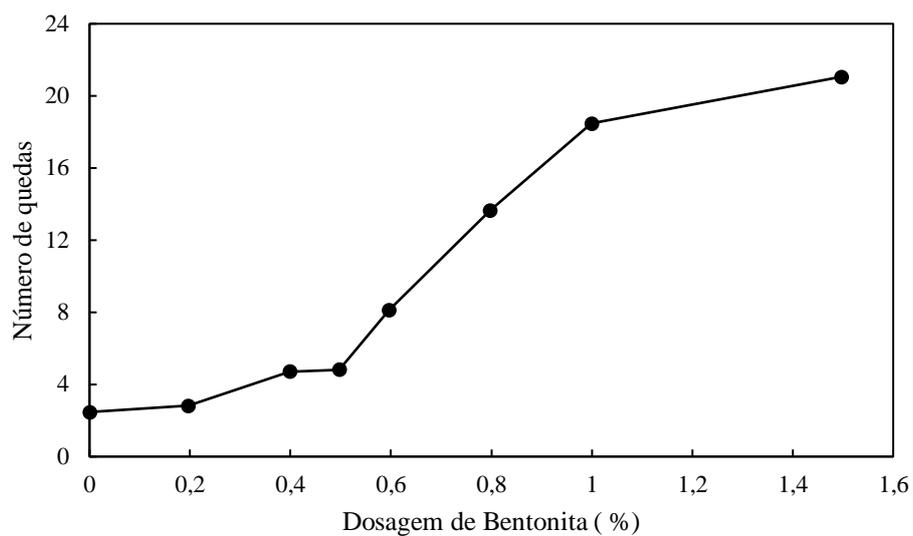


Figura 3.14 Número de queda em função da dosagem de bentonita
 Fonte: adaptado de Forsmo *et al.* (2006)

Srivastrava *et al.* (2013) realizaram um estudo sobre os diferentes tipos de aglomerantes orgânicos e inorgânicos para produzir pelotas de minério de ferro. As pelotas, produzidas com os diferentes aglomerantes, foram comparadas com as pelotas produzidas com bentonita por meios de testes de resistência física, como mostra a Figura 3.15, e mostraram que as pelotas possuem resistência mecânica suficiente para sobreviverem ao transporte e manuseio.

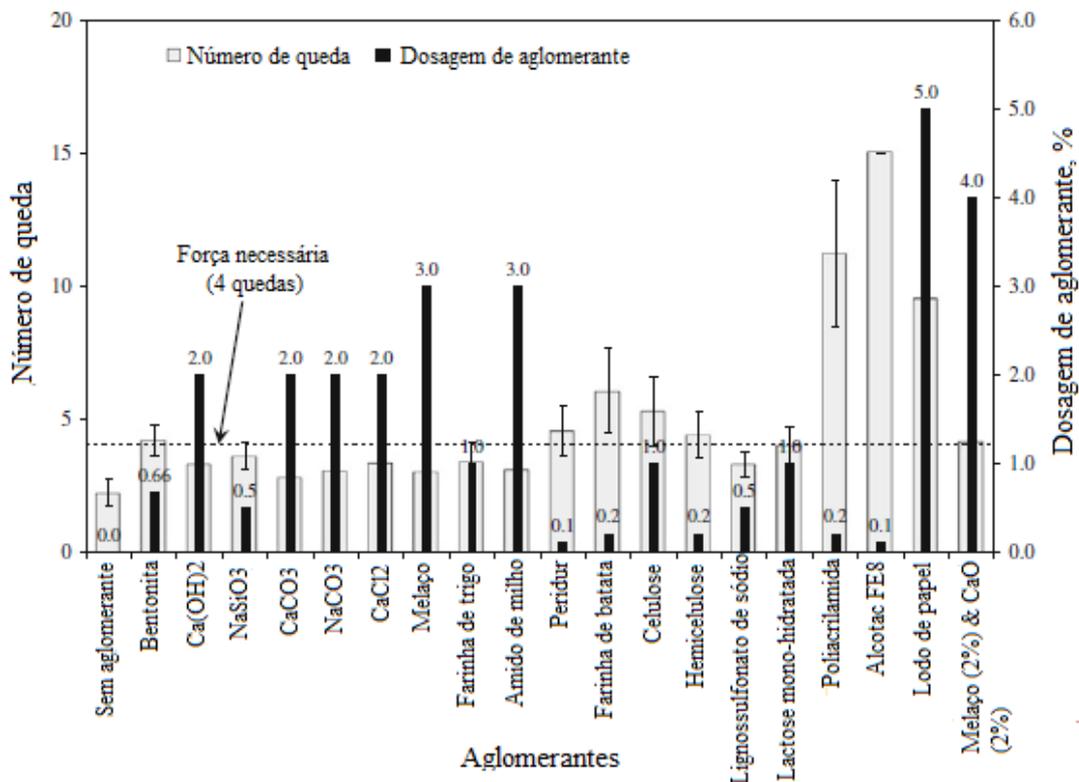


Figura 3.15 Número de queda para pelotas de óxido de ferro usando diferentes tipos de aglomerantes orgânicos e inorgânicos
 Fonte: adaptado de Srivastava *et al.* (2013)

Outra variável que influencia o número de quedas é a distribuição granulométrica das partículas na alimentação. Abouzeid *et al.* (1979) mostram (Figura 3.16) que à medida que a *pellet feed* se torna mais fino, o número de quedas aumenta. O que explica esta ocorrência é o forte efeito das forças moleculares, por exemplo, as forças de Van der Waals, refletidas no teste de queda com o aumento do comportamento plástico das pelotas verdes. As forças coesivas e capilares nos poros dos grânulos iniciais aumentam à medida que a alimentação se torna mais fina, o que também contribui para o aumento da plasticidade das pelotas. Já a resistência à compressão diminui, devido ao fato que quanto mais fina a granulometria, maior será a taxa de crescimento da pelota, reduzindo o tempo de residência do pelletamento e, conseqüentemente haverá menos interligações e distribuições de partículas, e menos efetividade nas interações entre partículas e umidade.

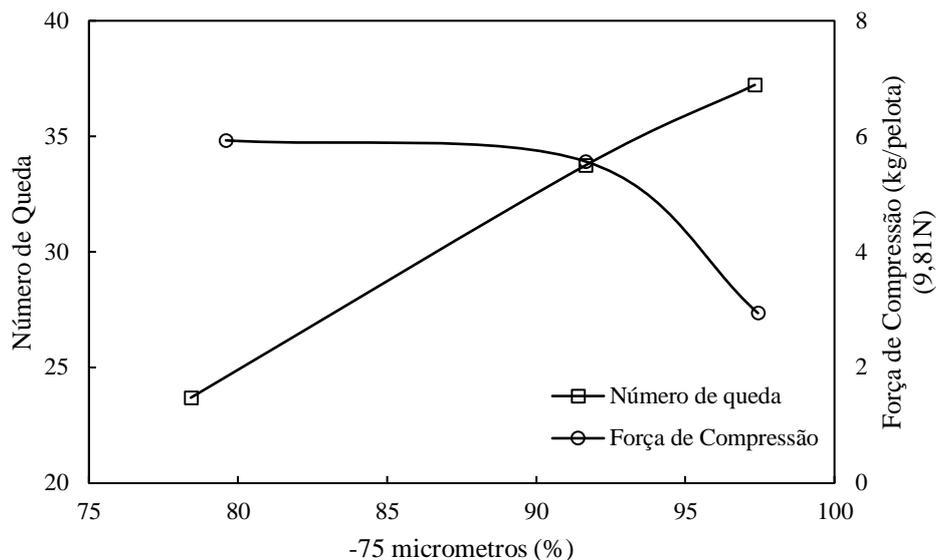


Figura 3.16 Propriedades físicas das pelotas em função do grau de finura na alimentação
 Fonte: adaptado de Abouzeid *et al.* (1979)

Abouzeid *et al.* (1979) também estudaram a influência do teor de umidade na resistência das pelotas. A Figura 3.17 relaciona o teor de umidade com o número de queda, juntamente com a resistência à compressão. O número de queda, que é, em média, muito superior àqueles usuais na indústria, aumenta até um certo limite à medida que o teor de umidade aumenta. Ao atingir este limite, o número de quedas diminui, mesmo com o aumento gradativo do teor de umidade. A explicação deste comportamento se deve ao fato que em baixos teores de umidade, o número de pontes capilares entre as partículas é pequeno, o que ocasiona menor força de coesão entre os grãos das pelotas. Com o aumento do teor de umidade, aumenta-se o número de pontes líquidas entre as partículas, tornando a resistência das pelotas mais alta. Porém isso acontece até um certo limite crítico de teor de umidade, em que as forças capilares diminuem, pois há formação de pontes líquidas de grande diâmetro que resultam em partículas menos coesas, diminuindo o número de queda.

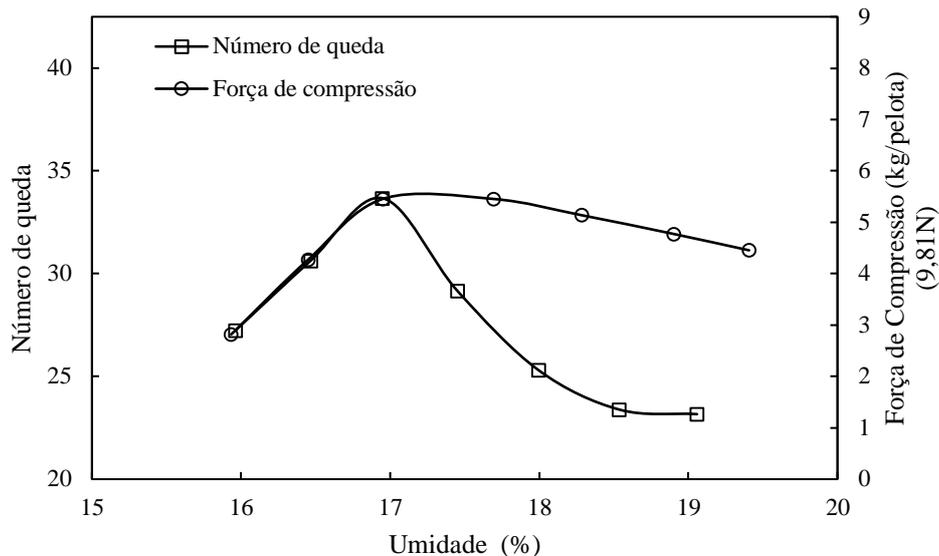


Figura 3.17 Propriedades física das pelotas em função do teor de umidade
 Fonte: adaptado de Abouzeid *et al.* (1979)

Goenka e Naik (2013) também estudaram a influência de diferentes porcentagens de umidade (11, 13, 15 e 17 %) em pelotas de hematita com granulometria inferior a 45 μm por meio de teste de queda. Os resultados podem ser vistos na Figura 3.18.

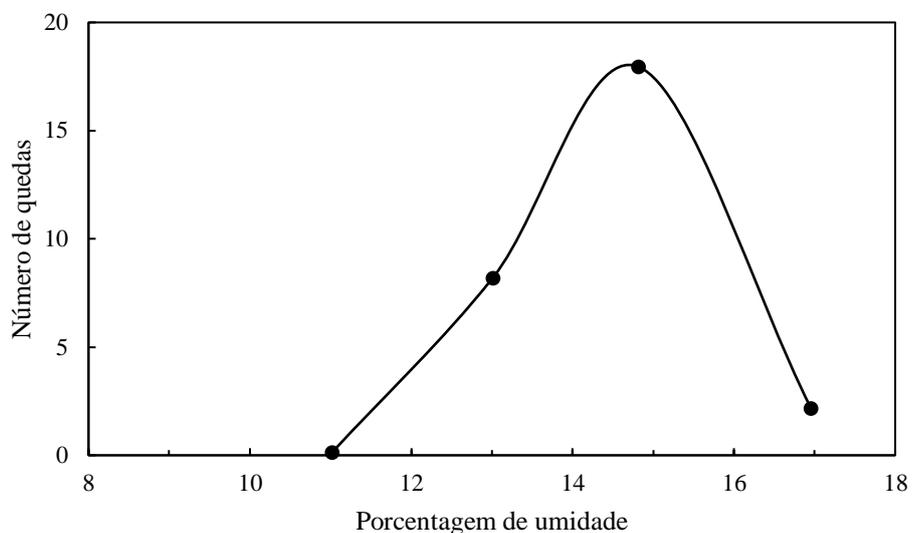


Figura 3.18 Resposta do teste de queda em função da variação da umidade na formação das pelotas verdes
 Fonte: adaptado de Goenka e Naik (2013)

Goenka e Naik (2013) observaram que com 11 % de umidade não ocorre formação das pelotas, ou seja, a quantidade de água é insuficiente para sua formação. As pelotas verdes formadas com 15 % e 17 % de umidade sofreram degradação após a primeira queda. Eles ainda observaram que com 17 % de umidade houve maior deformação. Além

disso, obtiveram um número de queda máximo para o teor de umidade de 15 %. Eles concluíram que com os teores de umidade de 11 % e 17 % não são adequados para a pelotização de finos do minério de ferro em questão com tamanhos de partículas inferiores a 45 μm . Embora os resultados estejam acima dos habituais utilizados na indústria, o estudo feito por Goenka e Naik (2013) mostra claramente o efeito do teor de umidade na resistência mecânicas das pelotas verdes e a importância do controle desta variável na formação das pelotas verdes.

Apesar da grande base de conhecimento acumulado com o ensaio de queda na altura padronizada pela ISO, o mesmo fornece apenas uma referência para a resistência ao impacto de pelotas e não reproduz as condições às quais pelotas são sujeitas aos esforços na usina de pelotização, até chegar ao forno de endurecimento, que inclui diferentes velocidades de queda, superfícies e ângulos de impacto.

3.7 DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DURANTE O MANUSEIO

A degradação é um tipo de deformação que gera uma fração de tamanho indesejado, resultante do manuseio e transporte do aglomerado. Um sólido em geral, quando submetido a qualquer tipo de esforço exprime como resposta uma deformação. Esta pode se apresentar de forma elástica, ou seja, quando o material reage somente em relação ao esforço atuante, recuperando a energia proveniente da deformação caso ocorra o descarregamento, ou inelástica, na qual o material sofre deformação permanente, onde parte da energia é recuperada e a outra parcela é transformada em mecanismos de rearranjos internos de sua estrutura, sendo irrecuperável (TAVARES, 2004).

Quando um material que contém uma trinca é tensionado, esta trinca age como concentrador de esforços em sua extremidade, resultando na criação de outras superfícies através de sua propagação. A trinca só irá propagar se a liberação de energia elástica de deformação for superior à energia necessária para gerar novas superfícies. Neste caso, a fratura ocorre quando as trincas coalescem, emergindo até à superfície, originando uma fratura macroscópica (TAVARES, 2004).

Como sabido, as pelotas são aglomerados de partículas finas, sendo estas ligadas física e quimicamente umas às outras. Essas ligações podem ser rompidas devido à aplicação de esforços normais, os quais correspondem aos carregamentos por

compressão, sejam eles aplicados lentamente, ou rapidamente como no caso de impactos, ou à aplicação de esforços tangenciais decorrentes dos carregamentos de cisalhamento.

O circuito de manuseio das pelotas verdes, desde o processo de pelletização até o processo de endurecimento, contém estágios de transferência em diferentes alturas, os quais são pontos onde ocorrem maior degradação das pelotas. O principal efeito nocivo dessas sucessões de quedas ao longo do percurso é a geração de trincas que fragilizam as pelotas gerando finos e reduzindo sua resistência física após o processo de queima, ou até mesmo a quebra de pelotas. A Figura 3.19 mostra a disposição dos estágios de transferência de uma usina de pelletização, que resulta em uma altura total de queda da ordem de 3,2 m do disco ao forno de endurecimento.

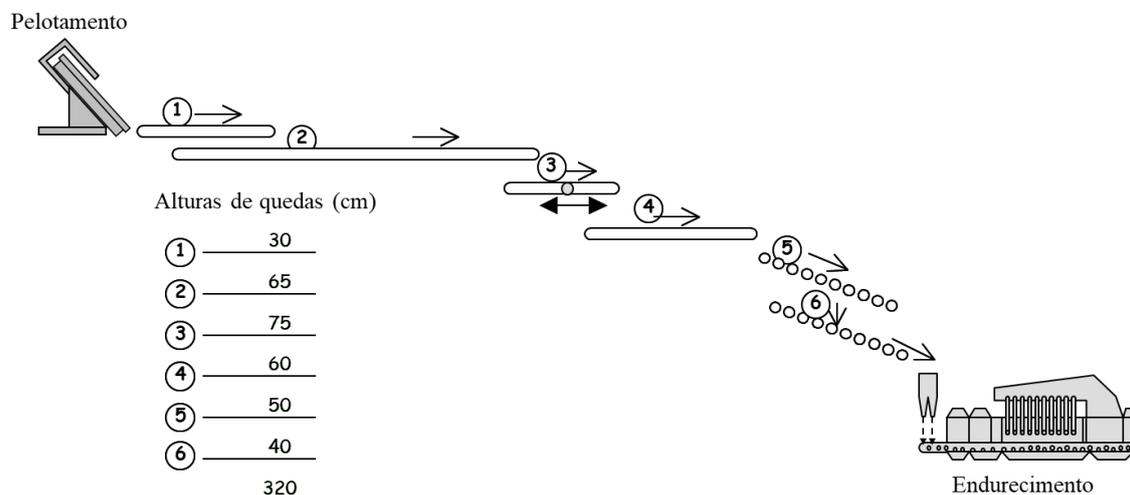


Figura 3.19 Layout dos estágios de transferência em diferentes alturas de uma usina de pelletização

Fonte: adaptado de VALE S.A.

Estudos sobre a degradação de pelotas verdes ainda são comparativamente escassos se comparados aos com pelotas após o processo de endurecimento. O processo térmico confere à pelota um aumento na sua resistência mecânica, porém estas também estão sujeitas ao desgaste mecânico progressivo, durante seu manuseio e transporte, por intermédio de equipamentos que se encontram no decorrer do processo de produção até seu destino final.

No caso das pelotas queimadas, os produtos de degradação, ou seja, as pelotas quebradas e cacos que não forem retirados do produto após a queima afetam negativamente o material comercializado. Por exemplo, produtos degradados com tamanhos muito pequenos resultam em redução e perda da produtividade do alto forno.

Além disso, os produtos degradados podem não atender ao requisito de tamanho exigido pelos clientes, resultando em uma penalidade nos valores de exportação (TEO *et al.*, 1990).

Teo *et al.* (1990) definiram dois mecanismos de geração dos produtos degradados em geral: quebra volumétrica e quebra superficial. Ambos mecanismos são diferenciados pela distribuição granulométrica dos produtos de degradação. A quebra volumétrica é o mecanismo denominado fratura ou fragmentação, por meio do qual a partícula se fratura completamente como fissuras produzindo uma série de fragmentos com tamanhos médios a finos. Por outro lado, a quebra superficial é o mecanismo pelo qual ocorre desgaste na superfície da partícula por abrasão ou corte, consequência de inúmeros contatos entre as superfícies das partículas e dos equipamentos, como correias transportadoras e chutes de transferência resultando em um arredondamento da partícula e contribuindo significativamente para a degradação do material durante o manuseio, como mostra a Figura 3.20.

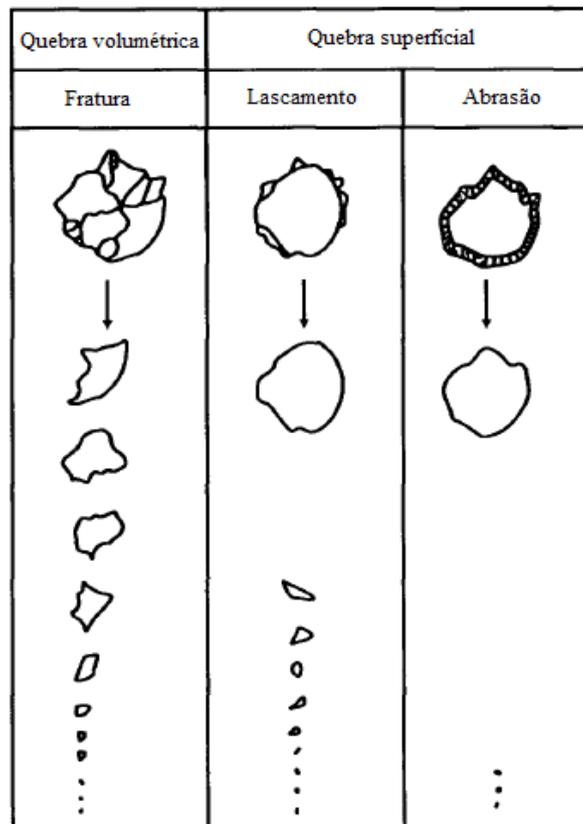


Figura 3.20 Mecanismos de geração de produtos degradados
 Fonte: adaptado de Teo *et al.* (1990)

Um aspecto importante a ser considerado é o caso em que partículas não sofrem fragmentação volumétrica no primeiro impacto, apenas quando são submetidas a esses esforços sucessivamente. Isso se dá pois a energia do impacto pode ser parcialmente acumulada na forma de dano interno, como uma ou mais trincas, ou seja, pode ocorrer que a energia aplicada não seja suficiente para realizar uma quebra. A energia então é aproveitada, e como resposta gera a propagação de trincas tornando a partícula menos resistente, diminuindo a energia específica necessária para a quebra em eventos subsequentes (Figura 3.21) (TAVARES e KING, 2002).

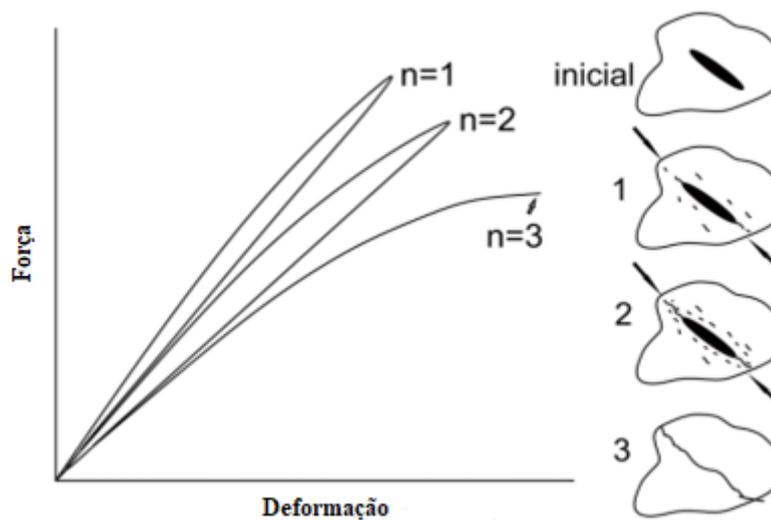


Figura 3.21 Acúmulo de dano na partícula devido à impactos repetidos
 Fonte: adaptado de Tavares (2009)

Tavares e King (2002) demonstraram que uma partícula frágil pode fraturar após múltiplos impactos pois:

- i. força de uma partícula depende de sua orientação, ou seja, impactos repetidos são necessários antes que uma orientação favorável em relação às falhas pré-existentes possa ser encontrada na partícula;
- ii. durante impactos repetidos, defeitos preexistentes podem ser capazes de crescer e atingir tamanho ou concentração crítica.

Em processos industriais de fragmentação, as partículas são fraturadas, principalmente, por esmagamento através de impactos, que alteram a estrutura interna da partícula, provocando fragmentação e/ou deformações inelásticas. Existe uma região de alta densidade de energia de deformação da partícula onde, abaixo desta, surgem esforços

de tração que se estendem até lado oposto de aplicação da carga. É nesse ponto, ou em uma trinca já existente, que se inicia a propagação de uma ou mais fraturas na partícula (TAVARES e KING, 2002).

A mecânica de dano é a resposta não-linear dos sólidos aos processos irreversíveis que ocorrem em sua microestrutura. O dano inicial pode evoluir em consequência do rompimento das ligações atômicas ou por ruptura na interface dos componentes do material. Essa degradação influencia diretamente nas propriedades elásticas do material, conforme evidenciam as reduções de resistência e de rigidez (PROENÇA, 2001).

Vários estudos têm sido realizados em escala laboratorial para maior entendimento sobre os principais fatores que influenciam na degradação das pelotas. O principal objetivo foi observar o comportamento mecânico dos materiais mediante condições e características específicas.

3.7.1 Influência do número de impactos e da altura total de queda

Ensaio com pêndulo duplo realizados por Weedon e Wilson (2000) mostraram que a substituição de um impacto por vários impactos de alturas mais baixas, considerando que a soma delas equivalessem à altura total para um único impacto, produzem a mesma proporção de finos. Por outro lado, Sahoo (2007) e Tavares e Carvalho (2011) verificaram que a proporção de finos gerados aumenta com a diminuição do número de impactos para uma mesma altura total de queda.

3.7.2 Efeito da estabilização e ordem dos eventos de impacto

Foi descoberto por pesquisadores (FAGERBERG e SANDBERG, 1973; WATERS *et al.*, 1987; TEO *et al.*, 1990; SAHOO *et al.*, 2002) que a sujeição de partículas a quedas repetidas resulta no fenômeno chamado estabilização. Isso acontece porque as partículas mais fracas submetidas ao manuseio são desintegradas rapidamente, de modo que o material restante se torna, em média, mais resistente do que o minério original. Na prática, o que acontece é que, como as partículas mais fracas são quebradas, apenas as partículas mais resistentes são deixadas na amostra, embora também tenham sido enfraquecidas (TAVARES e CARVALHO, 2011).

Norgate *et al.* (1986 apud TAVARES e CARVALHO, 2011) reconheceram que a degradação também depende da sequência de eventos de impacto. Eles observaram que uma altura de queda de um determinado valor causaria mais degradação no sistema de manuseio do que posteriormente devido ao condicionamento do minério, removendo as partículas mais fracas.

3.7.3 Efeito da superfície de impacto

Sahoo (2007) descreve que a degradação resultante é diferente quando se muda as superfícies de impacto. Foi verificado que a geração de finos por impacto aumentava mais rapidamente para superfícies mais rígidas, por exemplo, o aço.

3.7.4 Efeito do tamanho de partícula

Existe uma tendência de aumento da resistência de minérios à quebra com a diminuição do tamanho de uma partícula, conforme descrito por Weedon e Wilson (2000). De fato, Sahoo (2007) cita que a geração de finos como resultado de impactos sucessivos de partículas de carvão mineral a uma altura de 5 metros diminui com a redução do tamanho de partícula.

Diversos modelos matemáticos de degradação de minérios foram desenvolvidos, em escala de laboratório, baseados em ensaios de compressão de partículas, tamboramento, queda livre, dentre outros (TEO e WATERS, 1988; WEEDON e WILSON, 2000; SAHOO, 2007) para fornecer subsídios à indústria para prever a proporção de finos gerados durante o manuseio e transporte dos minérios e aglomerados.

No entanto, Tavares e Carvalho (2012) desenvolveram um modelo mecanicista para quantificar a degradação de minério de ferro granulado causada por pontos de transferências durante o manuseio. Este embasa-se no enfraquecimento de partículas como resultados dos impactos, o qual é fundamentado na mecânica do dano (TAVARES e KING, 2002). Esse modelo tem sido aplicado com sucesso a materiais frágeis como partículas de minério de ferro e pelotas queimadas, entre outros (TAVARES e CARVALHO, 2012; TAVARES *et al.*, 2015). A aplicação desse modelo, entretanto, ainda não foi demonstrada ser válida para materiais plásticos, como pelotas verdes de minério de ferro.

3.8 COMPORTAMENTO DE MATERIAIS FRÁGEIS E DÚCTEIS

Os padrões de ruptura dos materiais sólidos têm sido descritos como frágeis, semi-frágeis ou dúcteis. O modo frágil descreve quando o material sólido se rompe sem deformação plástica perceptível. Em contraste, o modo dúctil descreve a fratura com deformação plástica considerável no sólido. A curva de tensão versus deformação mostra o típico comportamento de um material dúctil e frágil (Figura 3.22). O modo de fratura semi-frágil ocorre quando a fratura frágil ocorre nos limites de uma região de deformação plástica limitada e, como tal, é um caso intermediário entre os modos de fratura frágil e dúctil (REYNOLDS *et al.*, 2005).

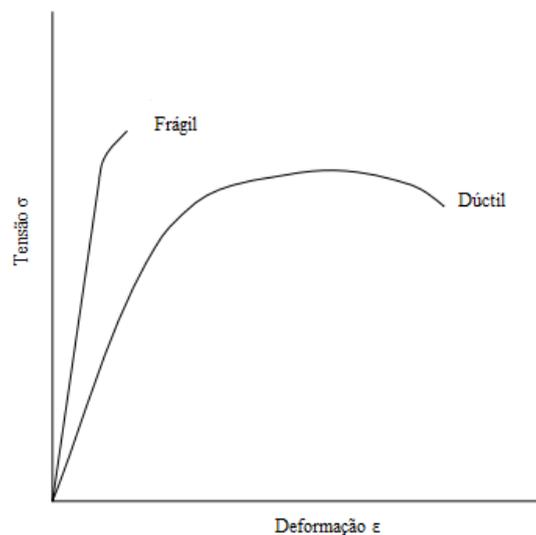


Figura 3.22 Curva de tensão versus deformação para materiais frágeis e dúcteis
Fonte: adaptado de Anderson (2012)

A abordagem sobre os materiais particulados se difere das usadas na mecânica da fratura e resistência dos materiais. As partículas não possuem estruturas internas regulares, dificultando o conhecimento das distribuições internas dos esforços. O comportamento de fragmentação de uma partícula individual é influenciado pela forma, pelo tamanho e pelas condições de carregamento das partículas. Segundo Cunha (2014) a influência da forma da partícula, e as diferenças no comportamento de fratura das partículas são relevantes, pois a forma de aplicação de energia, e os tempos de contato mudam conforme o formato da partícula.

As primeiras investigações sobre a força dos granulados que confirmaram a correlação micro-macro de ligações de partículas foram estudadas por Rumpf (1958),

Schubert (1975) e Kendall (1987) apud Antonyuk *et al.* (2005). A Figura 3.23 apresenta o desenvolvimento histórico da compreensão dos padrões de ruptura de uma partícula rígida esférica como consequência da propagação de microfissuras durante a deformação elástica e plástica na carga de impacto (SALMAN *et al.*, 2015).

O modelo inicial de Rumpf (1958) descreve a resistência à tração de uma partícula levando em consideração as forças de adesão nos pontos de contato de partículas primárias esféricas de tamanho único em um empacotamento aleatório.

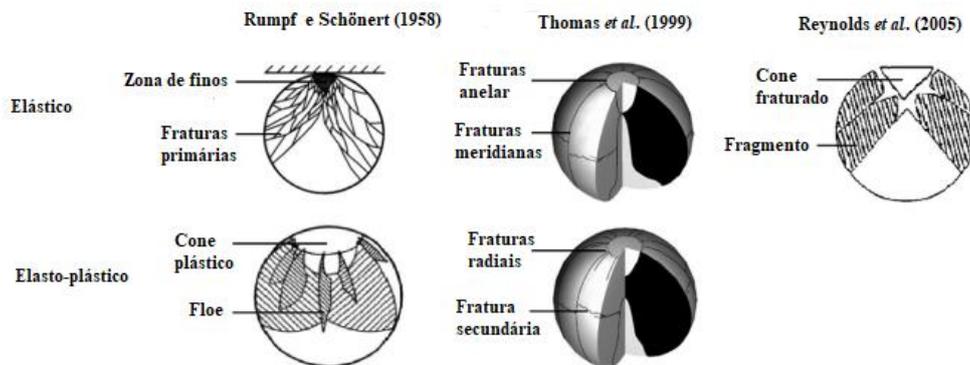


Figura 3.23 Evolução do estudo sobre microfissuras durante a deformação elástica e plástica.

Fonte: adaptado de Salman *et al.* (2015)

Mishra e Thornton (2001) identificaram quatro diferentes tipos de degradação com base na extensão do dano observado em um estudo sistemático do comportamento de impacto de um grânulo usando simulações computacionais:

- i. Fratura: este padrão de ruptura ocorre quando as trincas visíveis podem ser identificadas. Também pode ser usado quando dois ou mais fragmentos são formados além de alguns finos adjacentes ao local do impacto.
- ii. Quebra: ocorre em velocidades de impacto altas, onde fragmentos maiores podem ser divididos em pequenos aglomerados de partículas primárias.
- iii. Desintegração: quando um grande cluster é centrado na parte superior do aglomerado com o restante do aglomerado reduzido a pequenos aglomerados de partículas primárias.
- iv. Desintegração total: ocorre no caso em que não há nenhum aglomerado de grandes

dimensões sobrevivente após o impacto em velocidade muito alta.

Alternativamente, Salman *et al.* (2004) apresentam três regimes de fratura nos quais vários materiais podem ser classificados pela influência da velocidade de impacto. Os regimes de fratura são descritos por velocidades de impacto baixas, intermediárias e altas. Eles observam que as formas de fratura dos materiais particulados (Figura 3.24) são significativamente diferentes e dependem do material nos regimes de velocidade baixa e intermediária, enquanto muitos materiais exibem modos de fratura semelhantes em altas velocidades de impacto.

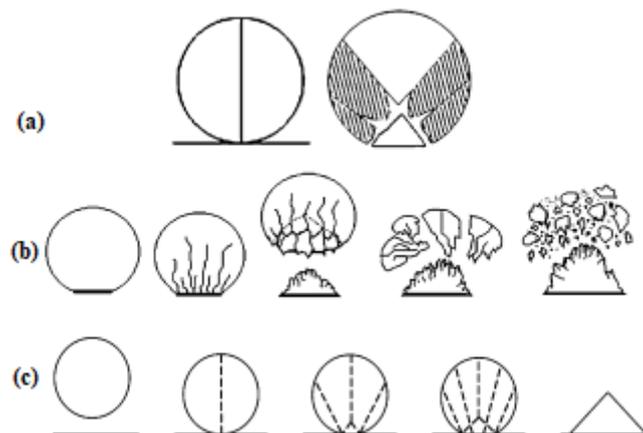


Figura 3.24 Vista lateral das formas de fratura: (a) grânulo sólido (b) grânulo úmido (c) grânulo sem aglomerante

Fonte: adaptado de Reynolds *et al.* (2005)

No caso de grânulos sólidos ou monolíticos (Figura 3.24 (a)) submetidos a impactos de velocidades baixas ocorre quebra local com o desenvolvimento de uma região plana sobre a área de contato acompanhada de alguma desintegração localizada. Além disso, uma ou mais fraturas se propagam do ápice da zona cônica através do espécime sobre os planos dos meridianos, que passam pelo centro da partícula. Nas velocidades de impacto intermediárias, observa-se que o número de segmentos de fratura aumenta. Em altas velocidades de impacto, um cone de material compactado e esmagado é formado no local do impacto, com várias rachaduras oblíquas se propagando através dos grânulos. Em particular, forma-se um grande fragmento em forma de cone característico, que se torna mais estreito e mais curto com o aumento da velocidade de impacto (REYNOLDS *et al.*, 2005).

A Figura 3.24 (b) mostra as formas de fratura em um grânulo úmido relativamente grande (5 mm) feito de carbonato de cálcio e polietilenoglicol (aglomerante) a

velocidades de impacto crescentes. Salman *et al.* (2004) relatam que a deformação plástica observada para baixas velocidades de impacto (< 8 m/s) (Figura 3.25) resultou em um achatamento da região de impacto, levando a uma área de contato relativamente grande, sem o aparecimento de trincas. O aumento rápido da velocidade de impacto a partir deste ponto resulta num número de pequenas fissuras que se propagam a partir da área de contato deformada, paralelas ao eixo de impacto.

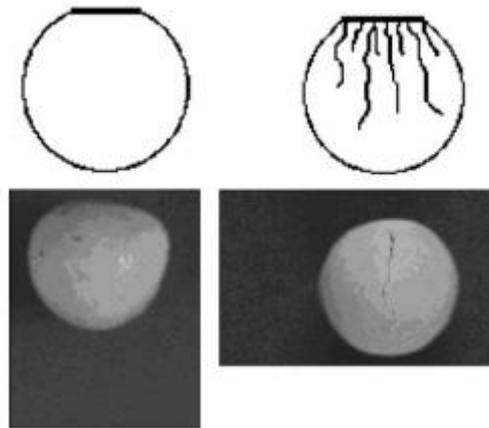


Figura 3.25 Fratura de grânulos úmidos após impactos de velocidade baixa
Fonte: adaptado de Salman *et al.* (2004)

O tipo de fratura à velocidade intermediária de impacto (> 12 m/s) para os grânulos úmidos pode ser observado na Figura 3.26. Inicialmente, um fragmento distinto em forma de cone é formado na região de contato, e o resíduo do granulado forma um fragmento de “copo de cogumelo”. Um aumento adicional na velocidade (> 16 m/s) acarreta na fragmentação do “copo de cogumelo” em várias partes de tamanhos semelhantes (SALMAN *et al.*, 2004).

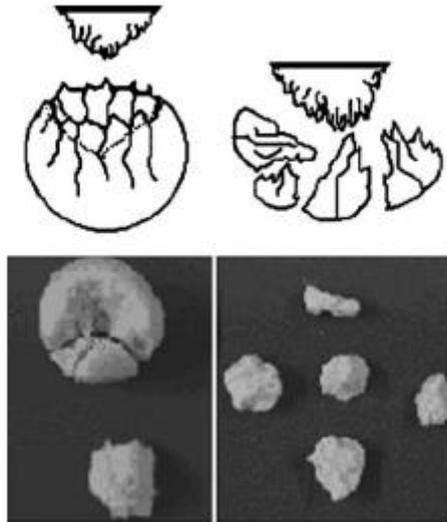


Figura 3.26 Fratura de grânulos úmidos após impactos de velocidade intermediária
 Fonte: adaptado de Salman *et al.* (2004)

O aumento da velocidade de impacto implica em mais trincas oblíquas se desenvolvendo resultando em danos localizados ao redor da área de contato, no qual todo o grânulo é transformado em uma única zona compactada aderida ao alvo. A velocidades de impacto acima de 20 m/s ocorre redução significativa do tamanho dos grânulos úmidos devido à extensa deformação plástica, como pode ser visto na Figura 3.27.

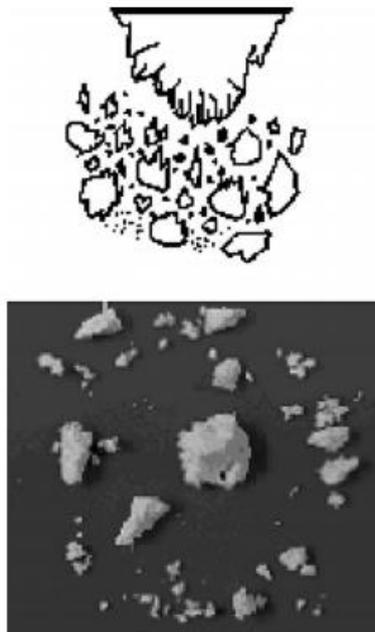


Figura 3.27 Fratura de grânulos úmidos após impactos de velocidade alta
 Fonte: adaptado de Salman *et al.* (2004)

Salman *et al.* (2004) também apresentam a forma de quebra de impacto dos grânulos sem aglomerante (Figura 3.24 (c)), onde a velocidades de impacto relativamente

baixas, as trincas se propagam da zona de impacto em direção ao hemisfério superior do grânulo. Algum achatamento da área de impacto, acompanhado de algum descolamento de material, também foi observado.

Além da velocidade de carregamento, o tipo de ligação que mantém as partículas coesas, influencia diretamente no tipo de fratura o qual o material terá como resposta. A Figura 3.28 mostra o tipo de quebra para materiais tipicamente frágeis, onde as forças de ligação das partículas são somente do tipo Van der Waals; um aglomerado sólido, através do qual as partículas são mantidas juntas por pontes sólidas, por exemplo pelotas queimadas; e os aglomerados úmidos, como no caso das pelotas verdes, que contêm pontes de ligação líquidas.



Figura 3.28 Exemplo de fratura de impacto para três tipos genéricos de aglomerados
Fonte: adaptado de Salman *et al.* (2007)

Nota-se que o aglomerado úmido possui uma deformação plástica devido à presença da ponte líquida. Kapur e Fuerstenau (1967) sugerem que a fratura é iniciada uma vez que a separação entre as ligações interpartículas ao longo de uma fratura potencial excedeu um valor crítico.

Como visto, o comportamento de quebra de produtos particulados tem sido estudado há anos. Outros pesquisadores, como Khanal *et al.* (2007), observaram a formação e propagação de microfissuras levando à quebra primária em aglomerados grosseiros como o concreto durante o carregamento repetido. Antonyuk *et al.* (2005) e Müller *et al.* (2011) observaram o mesmo para aglomerados finos, como grânulos. Descobertas semelhantes com considerações adicionais, tais como a influência da tensão superficial devido à presença de umidade no grânulo, foram relatadas em detalhes por Iveson e Page (2005).

Antonyuk *et al.* (2005) descreveram o comportamento de deformação e quebra de granulados através do teste de compressão de 100 partículas individuais de três granulados esféricos (γ - Al_2O_3 , zeólita sintética (Köstrolith) e benzoato de sódio ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$)) (Figura 3.29).

Os grânulos de γ - Al_2O_3 são insolúveis em água e são produzidos a partir do pó de óxido de alumínio. Os grânulos de zeólita sintética também são insolúveis em água e são produzidos a partir do pó de zeólita com argila mineral. Já os grânulos de benzoato de sódio são solúveis em água e são gerados por granulação em leito fluidizado sem aglutinante adicional (KAPUR e FUERSTENAU, 2011).

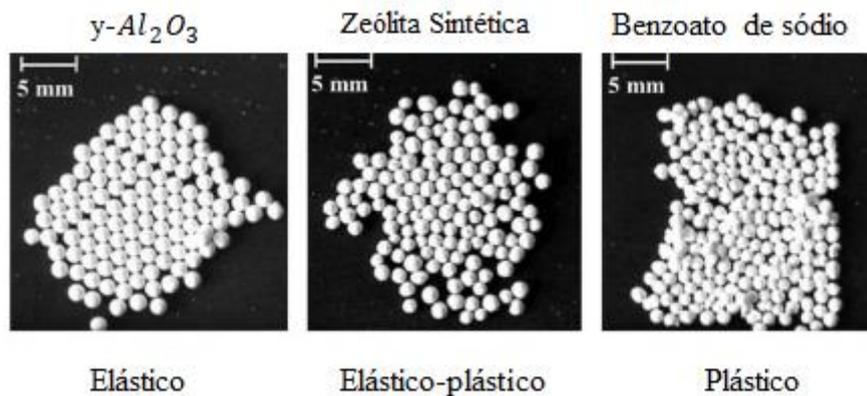


Figura 3.29 Comportamento das três amostras de granulados
Fonte: adaptado de Antonyuk *et al.* (2005)

O comportamento de compressão elástica dos granulados é descrito por meio de curvas de deslocamento forçado, por aplicação da teoria de contato de Hertz e da mecânica do dano contínuo (Equação 3.4) (TAVARES, 2009)

$$F = \frac{d^{1/2}}{3} k \alpha^{3/2} \quad (3.4)$$

na qual F é a carga, d é o tamanho da partícula, α é a deformação local.

O mecanismo de quebra depende se os grânulos apresentam deformações elásticas ou plásticas antes da fratura. A curva de deslocamento de força típica para o granulado γ - Al_2O_3 , utilizado para processos de secagem, com comportamento predominantemente elástico é descrito pela Figura 3.30.

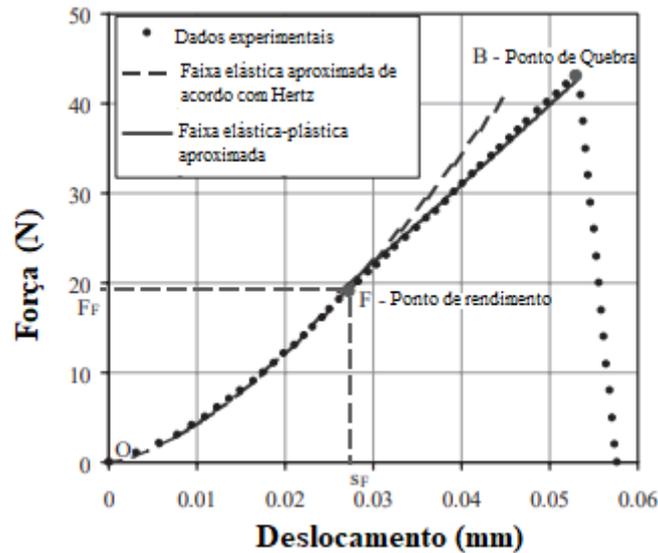


Figura 3.30 Curva de força versus deslocamento do $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
 Fonte: adaptado de Antonyuk et al. (2005)

Devido à curva parabólica, a rigidez de contato aumenta com o deslocamento crescente e atinge o máximo valor no ponto de escoamento F. Neste ponto, a deformação plástica começa. Isto é confirmado pelo crescente desvio da curva experimental F-B da curva teórica de Hertz (ANTONYUK *et al.*, 2005).

A zeólita sintética usada como adsorvente (peneira molecular) para processos de secagem e limpeza de gás, cujo comportamento é de material elástico-plástico, apresenta um comportamento de deformação de material frágil, no qual a quebra ocorre no ponto B com a força aproximadamente duas vezes maior que a força no ponto F. No entanto, no ponto de quebra a contribuição da deformação plástica em comparação com a deformação elástica é muito pequena, o que é confirmado pela pequena diferença na rigidez, como pode ser visto na Figura 3.31.

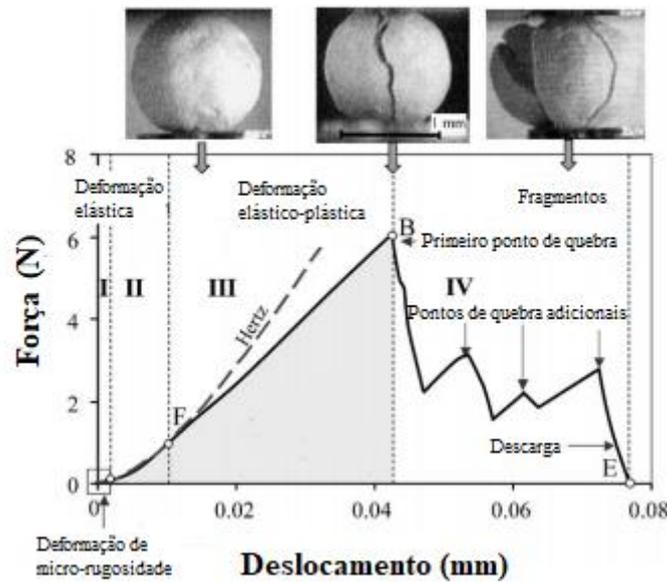


Figura 3.31 Curva de força versus deslocamento do zeólita sintética
 Fonte: adaptado de Antonyuk *et al.* (2005)

Já a curva de deslocamento de força do benzoato de sódio (Figura 3.32), conservante de alimentos e bebidas, cujo comportamento é totalmente plástico, é uma reta ao longo de toda região de deformação.

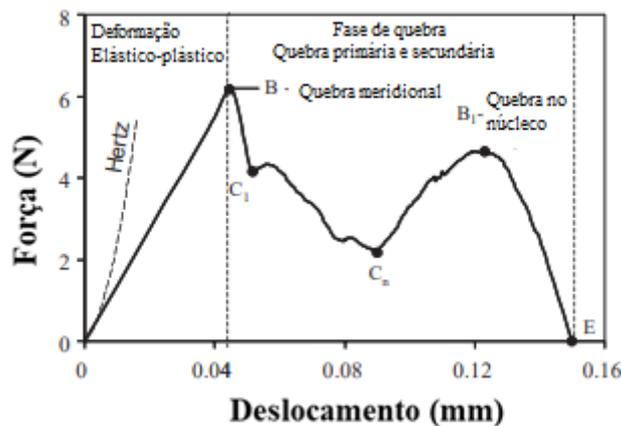


Figura 3.32 Curva de força versus deslocamento do benzoato de sódio
 Fonte: adaptado de Antonyuk *et al.* (2005)

Antonyuk *et al.* (2005) também estudaram a influência do tamanho dos grânulos nos comportamentos de deslocamento forçado a uma velocidade de compressão fixa (Figura 3.33). Eles concluíram que, no caso de grânulos maiores, tanto a força de ruptura quanto a rigidez de contato, aumentam durante os intervalos elástico e elástico-plástico.

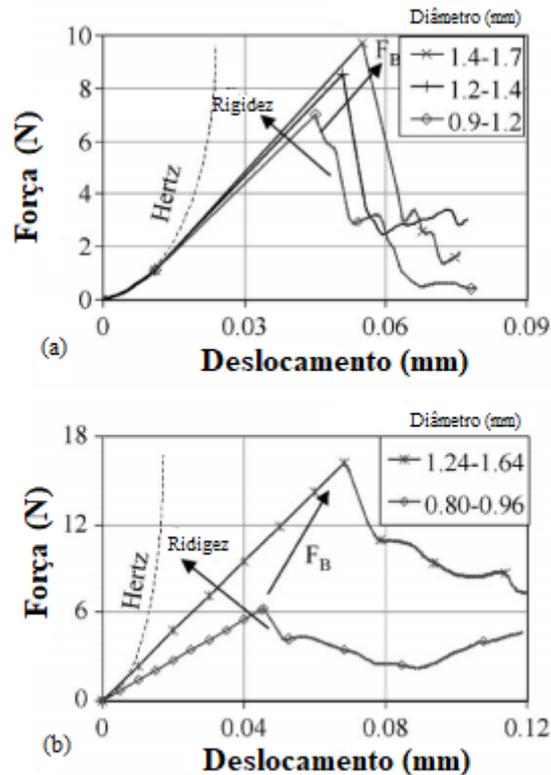


Figura 3.33 Influência do tamanho do grânulo na curva de força versus deslocamento
 (a) Zeólita sintética (b) Benzoato de sódio
 Fonte: adaptado de Antonyuk *et al.* (2005)

A velocidade de compressão tem forte efeito na força de ruptura e na rigidez de contato durante a deformação plástica no grânulo de zeólita sintética (Figura 3.34). Esta observação identifica o comportamento viscoplástico desses granulados (ANTONYUK *et al.*, 2005) Materiais com esse comportamento possuem uma memória, ou seja, após sofrerem alguma perturbação, tendem a voltar ao seu lugar de “conforto”. Porém o retorno para esta posição não sucede de maneira perfeita, visto que esse fenômeno é quase imperceptível já que não é um material completamente elástico. Pode-se dizer que todo material apresenta um tempo de relaxação característico, que está associado à memória (COSTA, 2016).

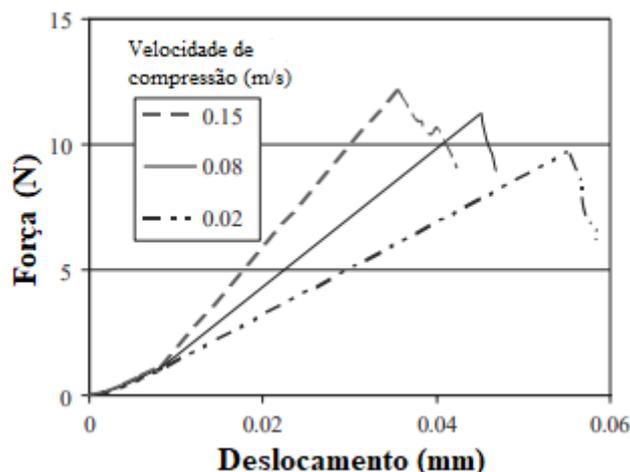


Figura 3.34 Curvas de força versus deslocamento da zeólita sintética para diferentes velocidades de carregamento
 Fonte: adaptado de Antonyuk *et al.* (2005)

Antonyuk *et al.* (2005) também investigaram o efeito do carregamento cíclico. Um grânulo de zeólita sintética foi repetidamente carregado e descarregado por uma força cíclica, respeitando a orientação do grânulo e a direção do pistão de tensão, ou seja, o grânulo foi submetido a esforços no mesmo ponto em sua superfície. A Figura 3.35 mostra uma grande deformação (O – U) demonstrada pelo comportamento elástico – plástico. A curva de descarga U–E é similar à curva de Hertz, portanto somente uma deformação elástica aparece durante o descarregamento.

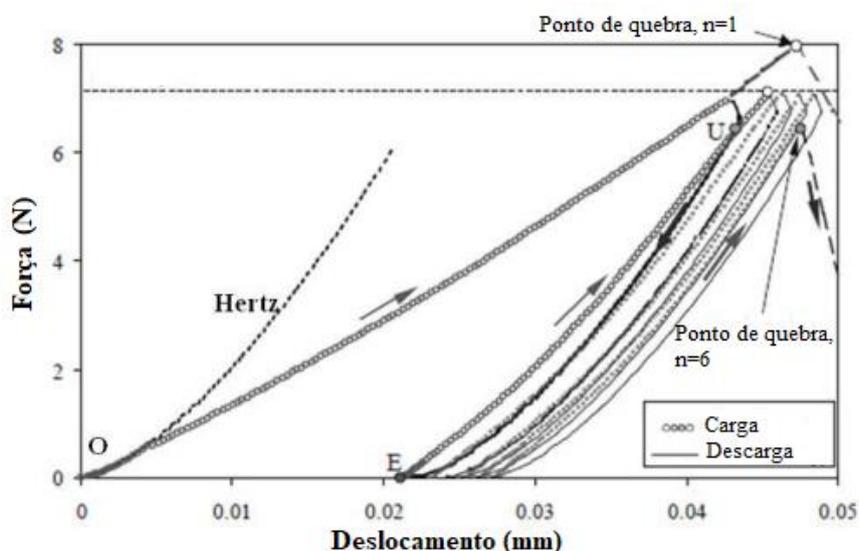


Figura 3.35 Efeito da carga e descarga na curva de força versus deslocamento de zeólita sintética
 Fonte: adaptado de Salman (2014)

O maior limite de ruptura e a máxima deformação foram realizados durante o primeiro ciclo. Há uma alteração na tensão total de um grânulo em cada ciclo de carregamento até o ponto de ruptura. O número de ciclos depende da intensidade do carregamento e das propriedades do material. A redução da deformação total mostra um efeito de rigidez durante os ciclos de carga e descarga (SALMAN, 2014).

Vale ressaltar que a aplicação repetida dos esforços em um ponto fixo de direção do grânulo gera deformação que implica na formação de trincas no ponto de contato do grânulo. O enrijecimento cíclico significa a mudança na estrutura do material nos pontos de contato, nos quais as tensões são muito altas. A densidade e rigidez nestes pontos aumentam sem qualquer mudança significativa das propriedades dos grânulos fora do ponto de contato. Com o aumento do número do ciclo, as microfissuras se propagam para dentro. O grânulo armazena energia de carga cíclica e os danos estão se desenvolvendo durante uma deformação elástica-plástica, o que resulta em uma força de quebra menor do que em um único evento de carregamento. O resultado pode ter um comportamento diferente se os grânulos forem girados durante o teste por esforço repetido (SALMAN, 2014).

As células de carga de impacto (CCI) também tem sido usada para medir a resistência da partícula à deformação e fratura como ensaio de *drop weight test*. O aparelho consiste em uma barra de aço posicionada ao centro e uma estrutura suspensa de disparo do impactor. A partícula é então pesada previamente e posicionada sob a barra de aço a uma altura conhecida. De modo a garantir que todas as partículas fraturem, uma bola de aço é solta caindo em queda livre até se chocar contra a partícula. Esta ação é repetida até que a partícula se rompa, registrando o seu momento de trinca e deformação total (TAVARES, 2009).

A curva de força-tempo medida no ensaio da CCI, ilustrada pela Figura 3.36, descreve a trajetória do carregamento da partícula, avaliando-a durante todo o evento de impacto. A perda da integridade, ou seja, a ruptura da partícula corresponde à força mais alta, representada pelo ponto A. Após a ruptura (trinca primária) a força exercida sobre a partícula reduz até que a bola aplique esforços sobre os fragmentos mesmo em queda, resultando em picos adicionais no gráfico, o ponto C é a posição final de repouso da esfera. A partir dessa curva é possível calcular alguns parâmetros relevantes das

características de deformação e fratura de materiais particulados, como a rigidez, a energia específica de fratura e a resistência à tração (TAVARES e LIMA, 2006).

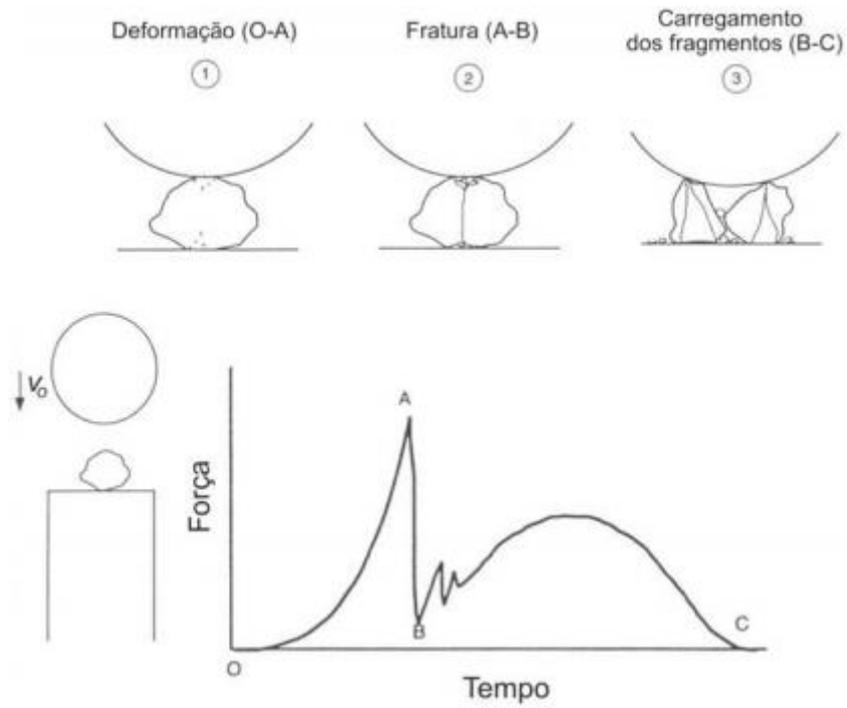


Figura 3.36 Ilustração da curva de força versus tempo medida em um impacto na CCI
Fonte: Tavares e Lima (2006)

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Dois tambores referentes ao mesmo lote de carregamento de *pellet feed* contendo previamente os aditivos em sua mistura (Tabela 4.1), foram enviados pela indústria produtora de pelotas ao Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM/COPPE) – UFRJ, juntamente com uma amostra do aglomerante (bentonita), acondicionado em um saco plástico. O mineral-minério predominante no *pellet feed* é a hematita.

Tabela 4-1 Características químicas e físicas do *pellet feed*

	Parâmetro	Pellet feed Valor
Composição química do pellet feed	Fe _{total} (%)	67,13
	SiO ₂ (%)	0,96
	CaO (%)	0,66
	Mn (%)	0,037
	MgO (%)	0,01
	P (%)	0,014
	TiO ₂ (%)	0,048
	Al ₂ O ₃ (%)	0,26
	Basicidade binária	0,69
Características físicas do pellet feed	Área superficial (cm ² /g)	1950
	<0,045 mm (%)	94,59
	Perda de ignição - LOI (%)	6,59
	Carvão antracito (%)	14,5

Ao chegar ao LTM, as amostras do *pellet feed* foram distribuídas em sacos plásticos vedados com aproximadamente 5 kg cada, para que houvesse uma manutenção rigorosa da porcentagem de umidade existente antes da adição do aglomerante bentonita.

A fim de avaliar a quantidade de água a ser adicionada nos testes, foi determinado o teor de umidade (base seca) presente nas amostras de *pellet feed* e bentonita, bem como das pelotas verdes produzidas como descrito na seção 4.2.

A adição do aglomerante foi realizada de acordo com a necessidade do teste. Para gerar as pelotas verdes semelhantes às da indústria foram utilizados 0,85% de bentonita. Porém foram feitos testes utilizando 0,55% e 1% de bentonita para avaliar a influência do aglomerante na formação e resistência das pelotas.

Posterior à adição da bentonita, a mistura foi homogeneizada cuidadosamente no próprio saco plástico para garantir que o aglomerante fosse distribuído de maneira

uniforme. Em seguida, foi adicionada à amostra uma porção de água para que atingisse o teor ótimo de umidade, similar àquele usado na usina industrial, o qual situa-se entre 8,0% a 9,5% em base úmida.

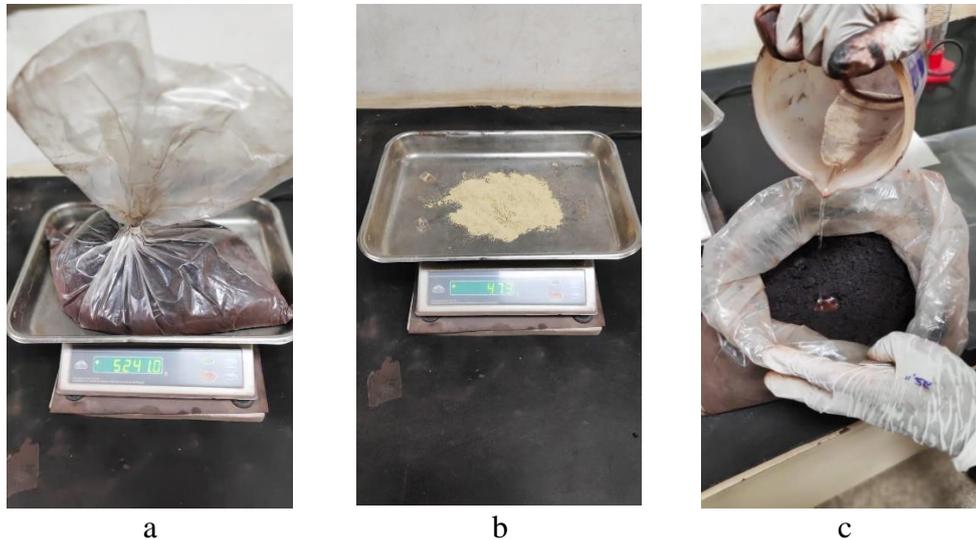


Figura 4.1 Preparação das amostras: a) amostras de *pellet feed*; b) pesagem do aglomerante bentonita; c) adição de água na mistura (*pellet feed* + aglomerante)

4.2 ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

A quantidade de água contida nos insumos (*pellet feed* e bentonita) e nas pelotas verdes é expressa em porcentagem em massa. Para determinar a porcentagem de umidade contida nos insumos, amostras de *pellet feed* e bentonita contendo aproximadamente 100 g cada foram secas em uma estufa a 105°C durante duas horas para determinação do teor de umidade, por meio da Equação 4.1:

$$u' \% = 100 \cdot \left(\frac{P_u}{P_s} \right) \quad (4.1)$$

Para estimar o teor de umidade das pelotas verdes (Equação 4.2), aproximadamente 100 g de pelotas contidas em cada faixa de tamanho foram também colocadas na estufa na mesma temperatura e período de secagem. Este procedimento foi repetido para cada batelada utilizada nos ensaios.

$$u \% = \frac{100 \cdot (P_u - P_s)}{P_u} \quad (4.2)$$

na qual u' % teor de umidade em base seca, u % é o teor de umidade em base úmida, P_u é o peso úmido e P_s é o peso seco.

A partir dos valores de teor de umidade obtida do *pellet feed* (7,0%) e no aglomerante (13,5%) foi possível calcular a quantidade de bentonita e de água a ser adicionada nos testes.

4.3 FORMAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS PELOTAS VERDES

Executados os procedimentos descritos em 4.1, a mistura (*pellet feed*, aglomerante e água) foi levada ao Laboratório de Estruturas (LabEst/COPPE) – UFRJ e inserida em um misturador Eirich em formato de disco (Figura 4.2 a) com um metro de diâmetro, angulação de 68° em relação a horizontal e velocidade de rotação de 16 rpm. Para iniciar a formação das pelotas verdes, o material foi adicionado com o misturador em repouso. Ao ligar o equipamento, observou-se o tempo inicial para que o processo de formação das pelotas fosse de 10 minutos. Para promover a aglomeração do material foi realizada cuidadosamente a aspersão, com um auxílio de um borrifador (Figura 4.2 b), de uma quantidade de água previamente calculada para que as pelotas estivessem dentro do limite de umidade entre 8,0 a 9,5%.



Figura 4.2 Ensaio para a produção das pelotas verdes: a) misturador Eirich; b) aspersão de água; c) pelotas verdes formadas

Após a formação, as pelotas verdes foram retiradas cuidadosamente com o auxílio de uma espátula para que não houvesse danos (Figura 4.4 a). Em seguida, às mesmas passaram por um processo de classificação manual em peneiras com abertura quadradas de 8, 10, 12,5 e 16 mm (Figura 4.4 b). As pelotas contidas nas faixas de tamanho de 8 a

10; 10 a 12,5 e 12,5 a 16 mm (Figura 4.3), foram colocadas em bandejas vedadas com sacos plásticos a fim de evitar a perda de umidade durante o seu transporte ao LTM e consequente introdução de viés nas etapas subsequentes (Figura 4.4 c) decorrentes de secagem. Já as pelotas maiores que 16 mm e menores que 8 mm foram descartadas juntamente com o material fino contido no disco de pelotamento.



Figura 4.3 Pelotas classificadas em diferentes faixas de tamanhos

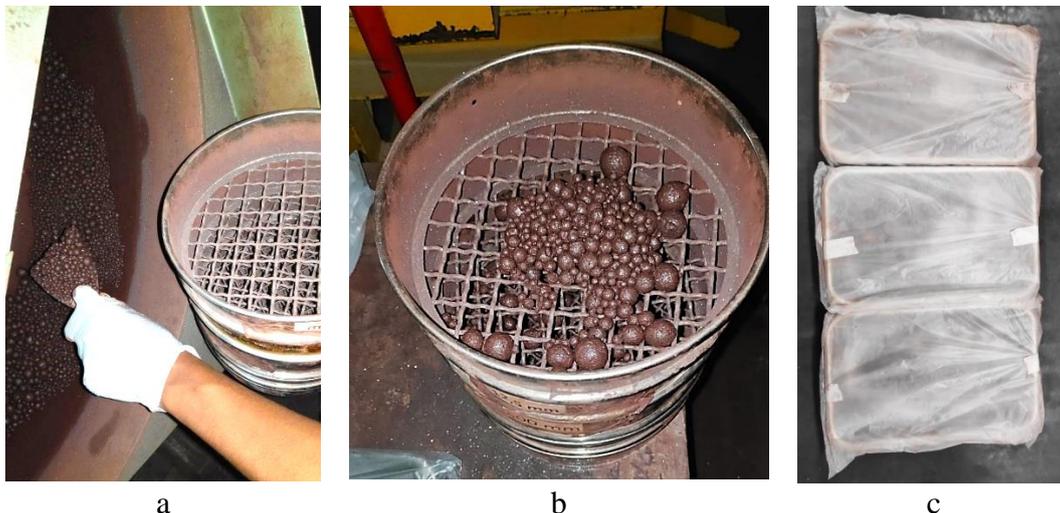


Figura 4.4 Classificação das pelotas verdes a) retirada das pelotas do disco; b) peneiramento; c) acondicionamento das pelotas de acordo com as faixas de tamanho

Para cada teste a ser estudado, foram preparadas bateladas idênticas seguindo os procedimentos descritos nas seções 4.1, 4.2 e 4.3 pois, como se tratam de pelotas verdes, estas não poderiam ser armazenadas devido a influência de uma das principais variáveis de controle, a umidade.

4.4 ENSAIOS DE QUEDA

Selecionaram-se aleatoriamente 100 pelotas verdes contidas em cada faixa de tamanho (8–10; 10–12,5 e 12,5– 6 mm), sendo essas soltas uma a uma a diferentes alturas (200, 100, 75, 46, 37 e 25 cm) até que todas as pelotas houvessem sido quebradas. Registrou-se, via inspeção visual, o número do impacto no qual alguma trinca pôde ser

identificada, bem como o número de impactos no qual cada pelota fraturou. A Figura 4.5 ilustra as características de pelotas consideradas fraturadas. A Tabela 4.2 apresenta os dados de altura de queda em metros e suas respectivas velocidades (m/s) e energias (J/kg) em queda livre.

Tabela 4-2 Velocidade e energia de impacto em queda livre correspondentes a cada altura de queda

Altura de queda (m)	Velocidade (m/s)	Energia (J/kg)
0,25	2,21	2,45
0,37	2,69	3,63
0,46	3,00	4,51
0,75	3,84	7,36
1,00	4,43	9,81
2,00	6,26	19,62

Durante a execução dos ensaios observou-se que a discriminação entre o modo de fragmentação, se superficial ou volumétrica não se mostrou necessária. Tão logo pelotas sofreram alguma evidência de fragmentação responsável por perda substancial de massa, como aquela ilustrada na Figura 4.5 c, sua integridade era imediatamente perdida em um evento subsequente de carregamento. Assim, com exceção de trincamento, quando pelotas se mostraram capazes de resistir a impactos subsequentes, fragmentações do tipo lascamento resultaram quase que invariavelmente em imediata perda total de integridade das pelotas.

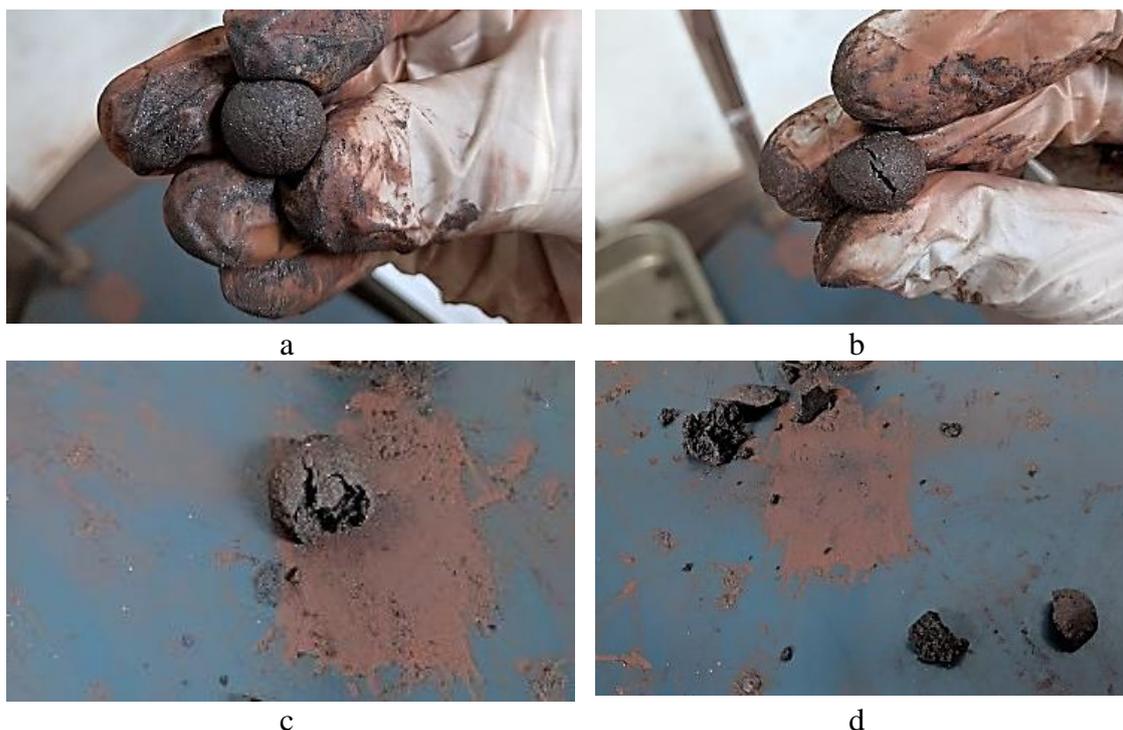


Figura 4.5 Formas de dano de pelotas verdes nos ensaios de queda: a) iniciação da trinca; b) afloramento da trinca na superfície da pelota; c) lascamento d) perda total da integridade

O dispositivo montado para o ensaio é ilustrado na Figura 4.6, o qual permite a substituição da superfície de impacto, permitindo utilizar-se aço e borracha, os quais foram objeto de estudo no presente trabalho. O dispositivo também permite a variação da inclinação como pode ser visto na Figura 4.7, com ângulos relativos ao impacto normal (90°), bem como os ângulos de 45° e 60° em relação à superfície de impacto tendo sido investigados. Adicionalmente, foram ainda realizados ensaios alternando a altura de queda, apenas com pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm.

Como já mencionado, tendo em vista o grande volume de material demandado nos ensaios, bem como o fato que pelotas cruas não podem ser armazenadas por períodos superiores a um dia, uma vez que o teor de umidade contido não seria mantido constante, foram preparadas diversas bateladas de pelotas para atender à demanda dos vários ensaios. A fim de garantir que variações entre bateladas não fossem significativas, uma amostra de 20 pelotas compreendida na faixa de 10–12,5 mm foi selecionada de cada batelada e submetida ao teste de queda na altura padrão de 46 cm e o número médio de queda necessário para quebrar as pelotas foi registrado. Assim, se o número de queda calculado estivesse dentro do intervalo compreendido entre 4 e 7, a batelada produzida

era considerada aceitável e usada nos ensaios pertinentes. Caso contrário, a batelada era descartada.

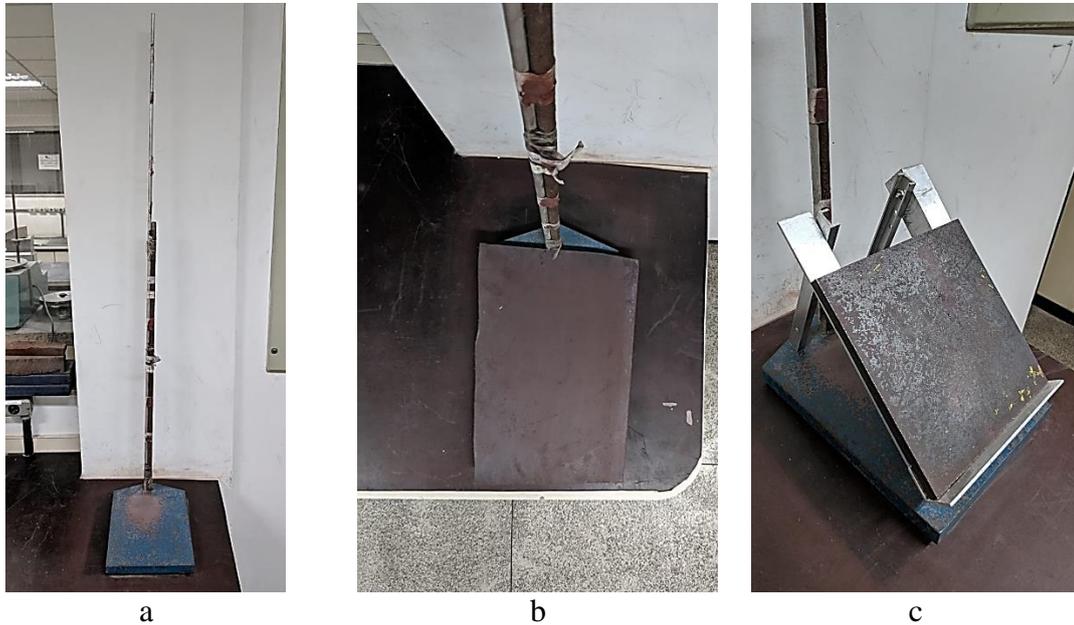


Figura 4.6 Estação de teste de queda: a) dispositivo com a superfície de aço; b) dispositivo com a superfície de borracha c) aparato de inclinação da superfície para ensaio com ângulos variados

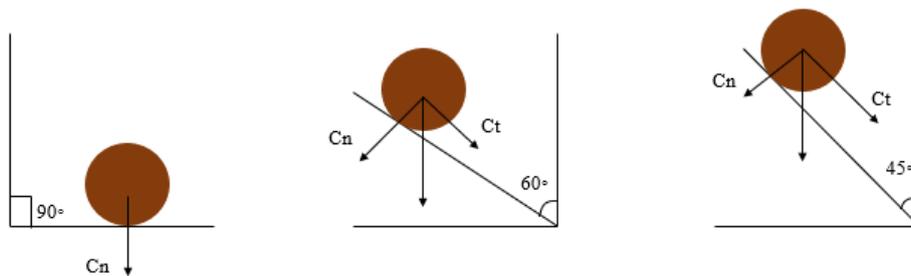


Figura 4.7 Decomposição da componente de força exercida pela pelota à superfície com inclinação

4.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão individual das pelotas, rotineiramente realizado na indústria, segue a norma ISO 4700. Deve ser realizado com um mínimo de 60 partículas e é utilizado para avaliar a resistência das pelotas quando submetidas a ação

mecânica de cargas. Este método é o mais utilizado para avaliar o comportamento mecânico das pelotas quando submetidas a impactos durante o manuseio e transporte.

Assim, a resistência à compressão das pelotas verdes foi avaliada de acordo com a norma ISO 4700. Um lote de 100 pelotas verdes de cada faixa de tamanho (8–10; 10–12,5 e 12,5–16 mm) foi coletado logo após sua formação no disco pelletizador, sendo uma a uma pesada (Figura 4.7 a) e comprimida por um pistão com velocidade de avanço de 10 mm/min e deslocamento de 3 mm em uma prensa hidráulica INSTRON, modelo 33R 5567 (Figura 4.7 b) até a ruptura (Figura 4.7 c). O sistema de aquisição de dados da prensa registrou automaticamente os dados de carga de ruptura e as curvas de força versus deslocamento.

Adicionalmente e com o objetivo de investigar o efeito da taxa de carregamento foram realizados ensaios adotando o mesmo procedimento, porém com velocidade de avanço do pistão igual a 500 mm/min (velocidade máxima que a prensa hidráulica atinge) e 1 mm/min.

A mesma prensa e configuração relativa à norma ISO 4700 foi utilizada para analisar a resistência das pelotas após o processo de tratamento térmico, conforme descrito no item 4.7.

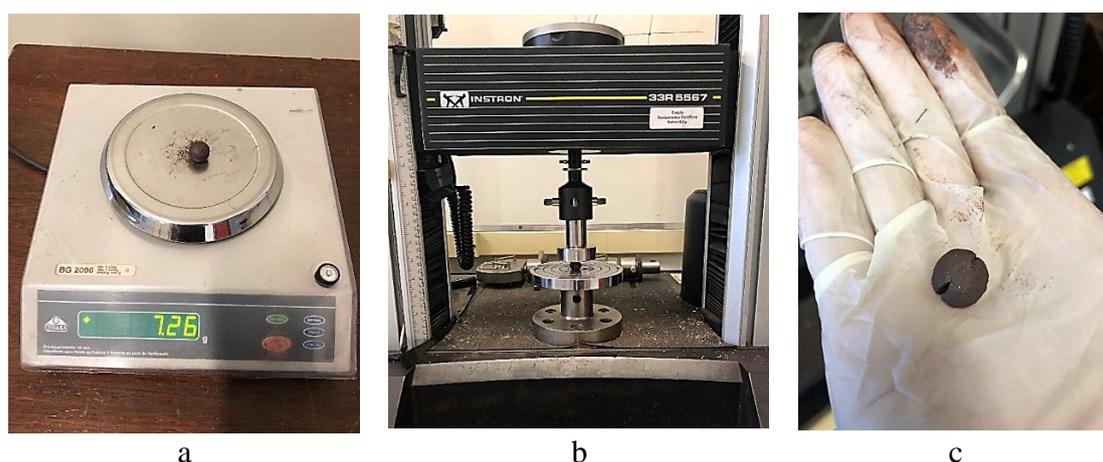


Figura 4.8 Compressão das pelotas verdes: a) pesagem das pelotas; b) prensa hidráulica INSTRON; c) pelota após o ensaio

O ensaio de resistência à compressão gerou curvas de força versus deslocamento para cada situação e permitiu calcular a área abaixo dessas curvas até o ponto de ruptura,

obtendo a energia específica de fratura, já que cada pelota foi pesada e a massa foi registrada. A energia específica foi determinada pela Equação 4.3. O ponto de ruptura é identificado nas curvas quando o pico mais alto sofre uma queda brusca.

A energia específica de fratura (E) absorvida pela pelota durante a compressão foi calculada a partir da integração do perfil de força versus deslocamento, dividido pela massa da pelota.

$$E_{k,n} = \frac{1}{m_p} \int_0^{\alpha_n} F d\alpha \quad (4.3)$$

na qual m_p é a massa da pelota, F é a força atuante e α é a deformação.

Além disso, foi determinada a resistência à compressão pela Equação 4.4 na qual F_f é a força responsável pela fratura e D é a distância entre os pontos de carregamento da partícula:

$$\alpha_p = \frac{2,8F_f}{\pi D^2} \quad (4.4)$$

Também foi medida a rigidez das pelotas (k_p) que é convenientemente determinada com base na teoria de contato de Hertz (Equação 3.4). As Equações 4.5 e 4.6 (TAVARES e KING, 1998) permitem, inicialmente o cálculo do K , coeficiente de deformação local do contato hertziano, o qual está relacionado à carga crítica e à energia de fratura da partícula, de modo que:

$$K = \left(0,576 \frac{F_f^3}{dE^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

$$k_p = \frac{K \cdot k}{k - K} \quad (4.6)$$

Na Equação 4.5 E é a energia de fratura e d é a distância entre os pontos de carregamento e é igual ao diâmetro das partículas no caso de partículas esféricas. Já na Equação 4.6, k é a rigidez das ferramentas (placas do equipamento de compressão, dada por $k = \gamma / (1 - \mu^2)$), em que γ é o módulo de Young e μ é a razão de Poisson.

4.6 ENSAIOS EM CÉLULA DE CARGA DE IMPACTO (CCI)

Com o objetivo de avaliar a variação da probabilidade de quebra sob carregamento duplo a velocidades de carregamento mais altas que aquelas alcançadas na prensa hidráulica, ensaios foram realizados na célula de carga de impacto (Figura 4.8).

Foram selecionados cinco impactores (esferas) de aço (Figura 4.9) com as respectivas massas: 4,09; 7,57; 16,77; 30,91 e 67,08 gramas para serem soltos à altura de 11 cm da bigorna, individualmente, em 50 pelotas verdes contidas na faixa de 10–12,5 mm, uma a uma, na célula de carga como mostra a Figura 4.9, de forma a manter a velocidade de carregamento constante. A energia específica de impacto foi estimada usando a Equação 4.7:

$$E = \frac{m_i \cdot g \cdot h}{m_p} \quad (4.7)$$

na qual m_i é a massa do impactor, g é a aceleração da gravidade, h é a altura do impactor até a pelota, igual a 10 cm, e m_p é a massa da pelota.

De forma análoga aos ensaios de queda, registrou-se, via inspeção visual, em qual impacto uma trinca pôde ser identificada (“trinca”), bem como o número de impactos no qual cada pelota se desintegrou totalmente (“quebra”).



Figura 4.9 Célula de Carga de Impacto (CCI)

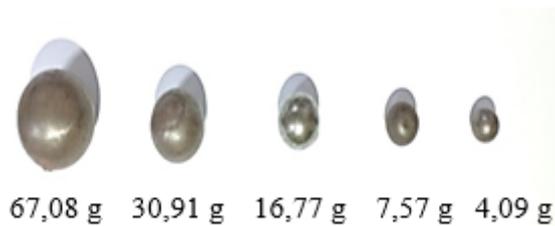


Figura 4.10 Impactores de aço utilizados nos testes na CCI

4.7 ETAPA DE ENDURECIMENTO DAS PELOTAS VERDES

Na etapa de endurecimento, as pelotas verdes foram secas na estufa a 105° C por um período de 24 horas. Após essa secagem, as pelotas foram acondicionadas em um cadinho de porcelana e submetidas a aquecimento em forno mufla Linn Elektro Therm (Figura 4.10) até a temperatura de 1200°C. Foram necessárias quatro horas até o equipamento atingir a temperatura de operação, permanecendo posteriormente na mesma por mais uma hora, finalizando assim o processo de queima das pelotas.

A fim de avaliar o efeito residual dos impactos, um lote de 30 pelotas verdes foi submetido a quatro quedas na altura de 46 cm, uma a uma, e então levadas ao mesmo procedimento de queima descrito anteriormente. Nesses quatro impactos nenhuma pelota sofreu quebra. Este limite de choque foi estipulado com base no trabalho de Meyer (1980) e nos testes de queda realizados no laboratório, sendo o número de queda médio que uma pelota verde resiste. Este número de queda seria suficiente para que as pelotas acumulassem algum dano, porém sem causar desintegração total da pelota. Este procedimento permitiu comparar a resistência de pelotas ainda intactas àquelas que sofreram danos devido ao impacto.



a



b



c



d

Figura 4.11 Etapa de endurecimento: a) forno mufla Linn Elektro Therm; b) vista interior do forno mufla; c) cadinho de porcelana com as pelotas secas; d) pelotas após o processo de queima

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTUDO DA DEGRADAÇÃO E AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS PELOTAS VERDES

Os estudos buscaram a compreensão da degradação das pelotas verdes por meio de ensaios de queda realizados com diversas variáveis: alturas, angulações e superfícies de impacto. Para entender seu comportamento e gerar subsídios para o desenvolvimento futuro de um modelo com capacidade de prever essa degradação, foram estudados o efeito de cada uma dessas variáveis a seguir. Simultaneamente, também foram realizados ensaios de compressão para medir a resistência e garantir a qualidade das pelotas produzidas no laboratório.

As pelotas verdes produzidas para o presente estudo obtiveram resistência à compressão média de 5,4 N na faixa de tamanho de 8–10 mm; 8,4 N para pelotas de 10–12,5 mm e 10,5 N para aquelas contidas na faixa de 12,5–16 mm, sendo apenas marginalmente inferiores àqueles indicados na Tabela 3.2.

5.1.1 Erro experimental

Os testes de queda denominados “padrão” foram realizados para garantir a constância e validar cada batelada utilizada na preparação de pelotas verdes. O teste padrão gerou números de queda predominantemente entre 4 e 7, o que pode ser considerado aceitável pois são superiores a 4 (MEYER, 1980), similar ao das pelotas produzidas pela indústria. As bateladas cujo número de queda se encontra neste intervalo, como mostra a Figura 5.1, foram consideradas de boa qualidade, já aquelas que apresentaram valores inferiores ou superiores a esse intervalo foram descartadas. Vale ressaltar que industrialmente esses testes de queda são realizados rotineiramente para controle da produção e visam identificar o aparecimento da primeira trinca como indicativo de dano à pelota. No presente trabalho, registrou-se não somente essa condição, como também aquela necessária para a quebra ou lascamento de uma parte considerável da pelota.

Adicionalmente a Figura 5.1 mostra a variação do teor de umidade de pelotas contidas em cada uma das bateladas, mostrando que não houve variação considerável.

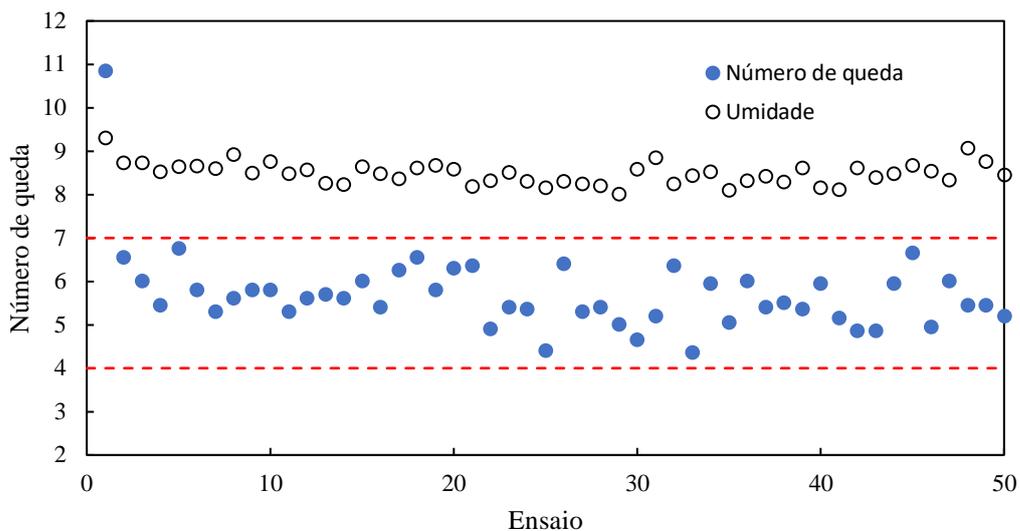


Figura 5.1 Número de queda pelo teste de queda padrão e teor de umidade de cada batelada

5.1.2 Efeito da altura de queda

O primeiro efeito estudado foi a influência de diferentes alturas de queda na resistência das pelotas. A Figura 5.2 mostra os resultados obtidos com uma única faixa de tamanhos de pelotas (10–12,5 mm) impactadas na superfície de aço nas alturas de 200, 100, 75, 46, 37, 25 e 15 cm.

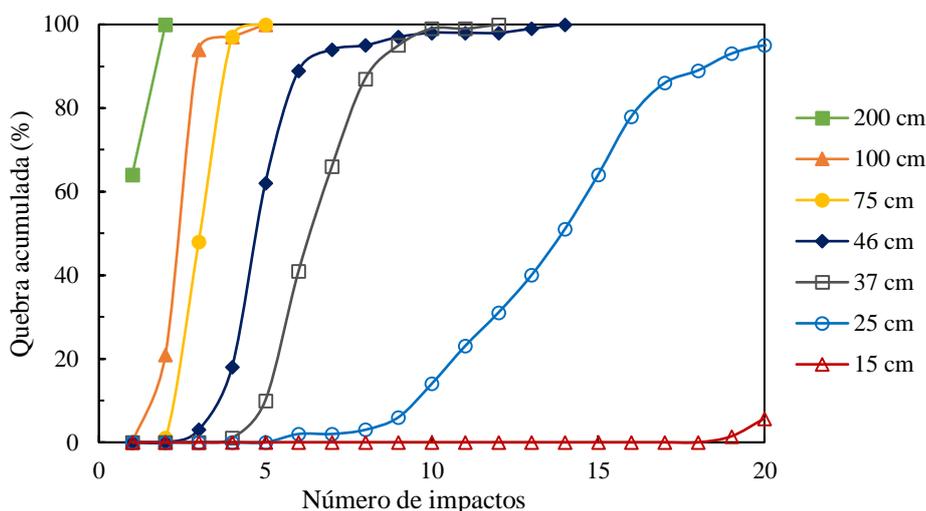


Figura 5.2 Efeito da altura de queda para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm para o caso da fratura de pelotas

Observa-se claramente que à medida que a altura aumenta e maior a energia de impacto, mais intensa se torna a degradação das pelotas. Por outro lado, ao passo que as alturas diminuem, mais as pelotas resistem aos impactos repetidos, o que fica ainda mais

evidente no caso dos ensaios nas alturas de queda de 25 e 15 cm. É interessante notar que, apenas com a exceção da altura de queda de 200 cm, nenhuma pelota se quebra ao sofrer o primeiro impacto. Essa aparente resiliência de pelotas verdes não é uma característica encontrada em materiais frágeis como pelotas queimadas (CAVALCANTI e TAVARES, 2018).

O número de queda calculado para cada altura reforça a resistência das pelotas ao impacto de menor energia como mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Número de queda para diferentes alturas de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm

Altura de queda (cm)	Número de queda
200	1,4
100	2,9
75	3,5
46	5,5
37	7,0
25	14,4

Além do momento de quebra das pelotas, também foram registrados os impactos nos quais foi identificado o aparecimento de trinca, o que é considerado um pré-requisito para a perda final de integridade da pelota. A Figura 5.3 mostra a sobreposição dos gráficos, onde pode-se analisar as curvas de proporção de pelotas trincadas para cada altura. Observa-se que as pelotas acumulam um tipo de dano interno que antecipa a sua quebra à medida que elas sofrem impactos repetidos. Na altura de 15 cm esse efeito é particularmente visível (Figura 5.3), pois na curva de quebra aparentemente nada acontece com a pelota até seu vigésimo choque. Por outro lado, na curva que apresenta a proporção de pelotas trincadas, já a partir do 11º impacto nota-se a influência do acúmulo de dano.

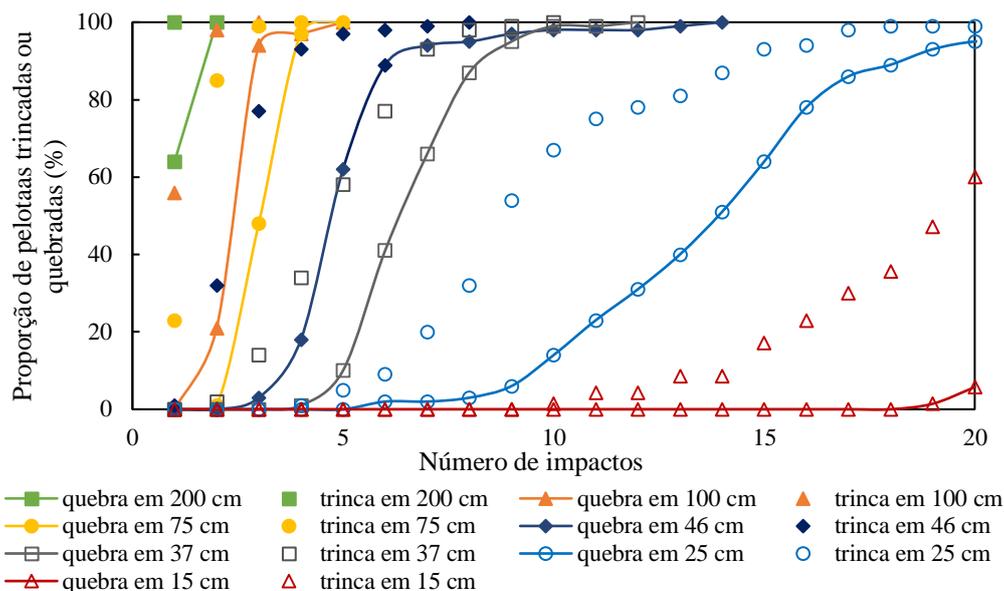


Figura 5.3 Proporção de pelotas trincadas e fraturadas em função do número de impactos para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm

A Figura 5.4 mostra as ocorrências de pelotas na faixa de tamanho de 10–12,5 mm trincadas e quebradas para cada altura de impacto. Os círculos azuis representam cada pelota e os números a sua volta representam cada incidência tanto do evento de trinca quanto de quebra para cada altura (25, 46, 75 e 100 cm). A bissetriz representa as pelotas que possuem o número de trinca igual ao de quebra, ou seja, pelotas não apresentaram trincas previamente a sua quebra, ou seja, quebra imediata. Pela figura, observa-se que apenas um número muito reduzido (5,8%) de pelotas apresentou esse comportamento, sobretudo aquelas submetidas às maiores alturas de queda.

Por outro lado, observa-se que a região onde o número de queda e trinca é menor se concentram os maiores números de incidências e também as maiores alturas. O histograma representado pela Figura 5.5 permite uma visualização mais clara desses resultados. Isso mostra que, independentemente da severidade do impacto, pelotas verdes inicialmente sofrem com o aparecimento de trincas superficiais para, somente depois disso, sofrerem ruptura.

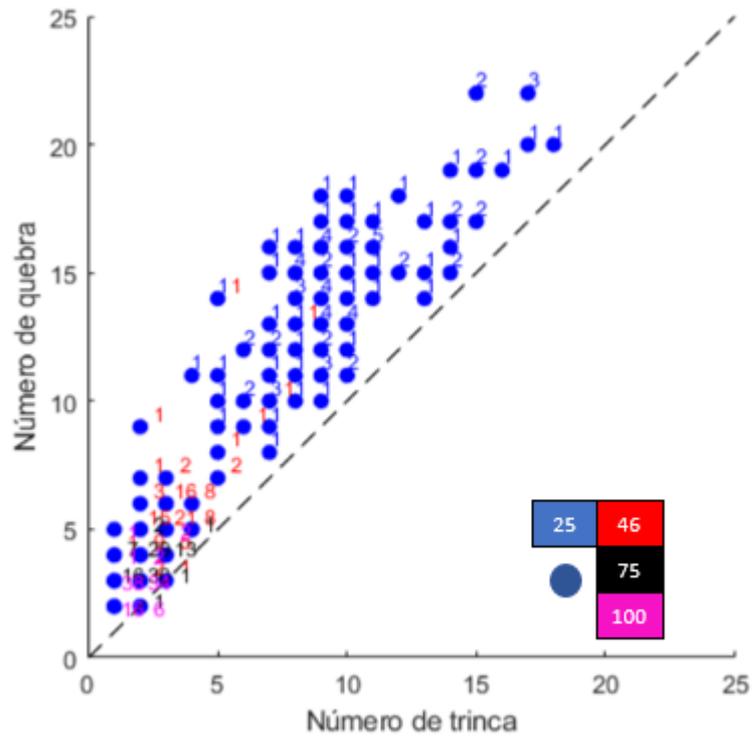


Figura 5.4 Número de incidência de trinca e quebra para cada pelota na faixa de 10 - 12,5 mm em cada altura de impacto. Os números indicam os quantitativos de dados superpostos na figura, enquanto as cores indicam as alturas de queda (em cm)

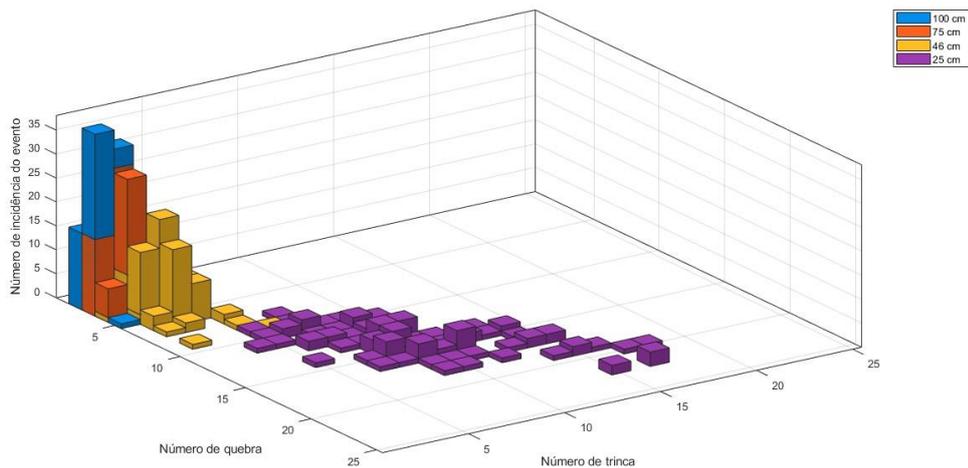


Figura 5.5 Histograma representativo das incidências de trinca e quebra para cada altura de impacto

Como evidenciado no estudo de Tavares e Carvalho (2012), quando a partícula cai de uma certa altura, ela pode ou não quebrar. Sempre que a partícula não quebrar

totalmente, a queda causa um certo dano, deixando-a enfraquecida (trincas) de modo que ela possa quebrar em impactos futuros. No caso das pelotas verdes, observa-se um aumento abrupto do número de pelotas quebradas para alguns números de impactos, dependendo da altura de queda. Isso revela uma diferença entre o comportamento de materiais frágeis, como aqueles modelados por Tavares e Carvalho (2012) e as pelotas verdes do presente trabalho, com comportamento plástico.

A Figura 5.6 ainda apresenta resultados de ensaios de queda, nos quais as alturas de queda foram alternadas. A primeira combinação é a alternância entre as alturas de 46 e 25 cm, na qual as pelotas foram submetidas inicialmente a quatro choques a 46 cm e o restante à altura de 25 cm até a sua quebra. Já na segunda combinação as pelotas foram soltas primeiramente na altura de 100 cm e, em seguida, na altura de 25 cm até a quebra. Nota-se que o comportamento dessas combinações converge com o resultado da altura de 46 cm, por ter praticamente a mesma energia de impacto.

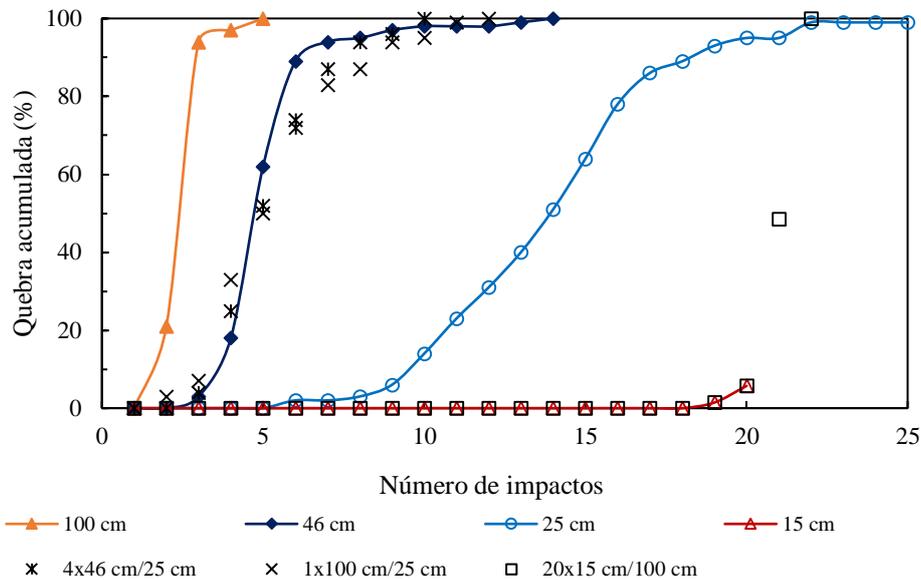


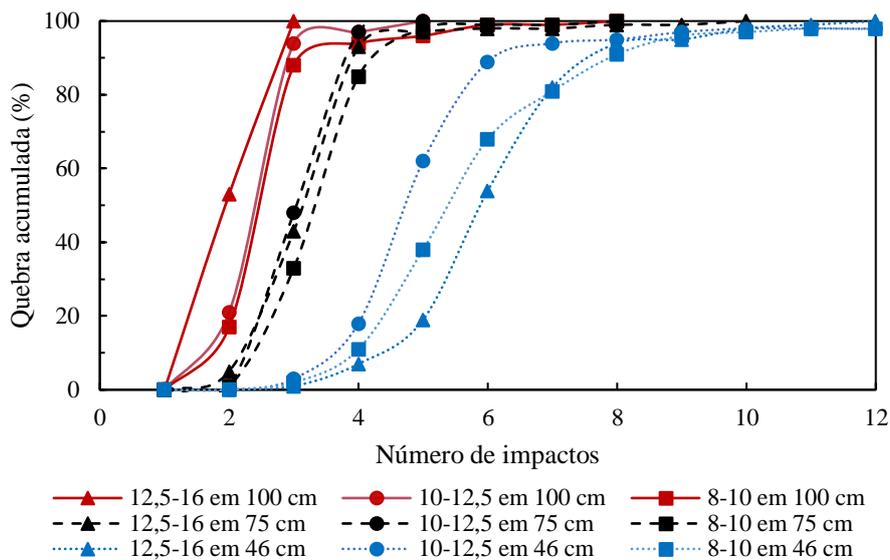
Figura 5.6 Alternância das alturas de queda para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm para a fratura de pelotas

Por outro lado, as alturas menores às quais as pelotas foram submetidas nas combinações são responsáveis pela redução da proporção quebrada. Na terceira combinação, as pelotas foram soltas 20 vezes da altura de 15 cm e posteriormente a alturas de 100 cm até atingir a quebra (Figura 5.6). Esta alternância reforçou a ideia de que em menores alturas maior número de eventos de impactos são necessários para causar dano

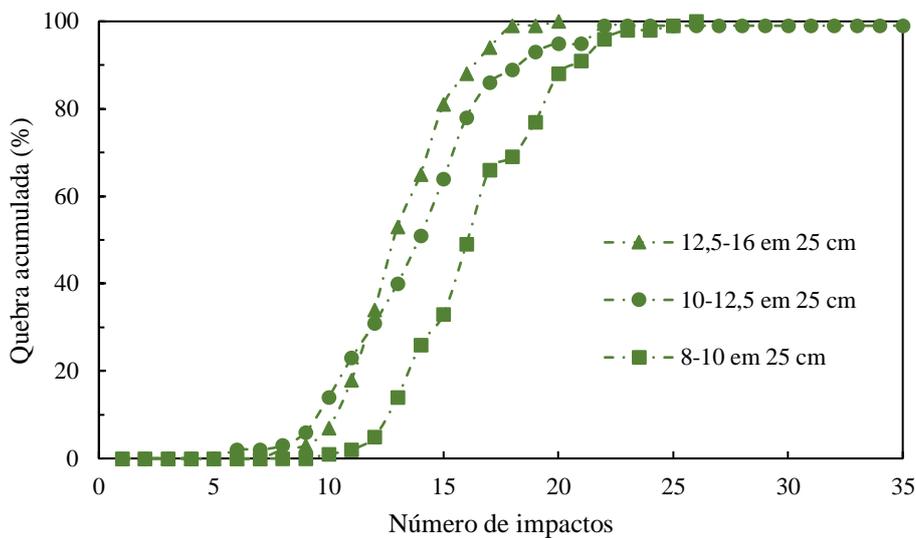
à pelota e então quando submetida à uma energia de impacto maior ela se degrada rapidamente.

5.1.3 Efeito do tamanho das pelotas

A Figura 5.7 mostra a porcentagem de quebra acumulada em relação ao número de impactos para pelotas contidas nas três faixas de tamanho (8–10; 10–12,5 e 12,5–16 mm) das pelotas verdes no aço como superfície de queda. Observa-se que não há uma clara influência do tamanho das pelotas quando se trata de alturas de queda maiores (Figura 5.7 a). Entretanto, tomando como base o 15º impacto na altura de 25 cm (Figura 5.7 b) as proporções de pelotas quebradas foram 33 % para pelotas de 8–10 mm; 64% de 10–12,5 mm e 81% para pelotas de 12,5–16 mm. Assim, há uma tendência do aumento da resistência à quebra com a diminuição do seu tamanho, porém isso se mostra mais evidente apenas para a menor altura de queda estudada (25 cm). No caso da fratura frágil, sabe-se que partículas menores são mais resistentes (CAVALCANTI e TAVARES, 2018), por possuírem menor quantidade de defeitos.



a



b

Figura 5.7 Efeito do tamanho das pelotas verdes na proporção de pelotas quebradas a diferentes alturas de queda no aço: a) alturas de 46, 75 e 100 cm; b) altura de 25 cm

O efeito do tamanho de pelota foi ainda analisado no que diz respeito ao ensaio de resistência, sendo os resultados apresentados na Figura 5.8. A figura evidencia o aumento na resistência das pelotas de acordo com o aumento de tamanho de pelota. As distribuições apresentam, entretanto, variabilidade similar para as diferentes faixas estudadas.

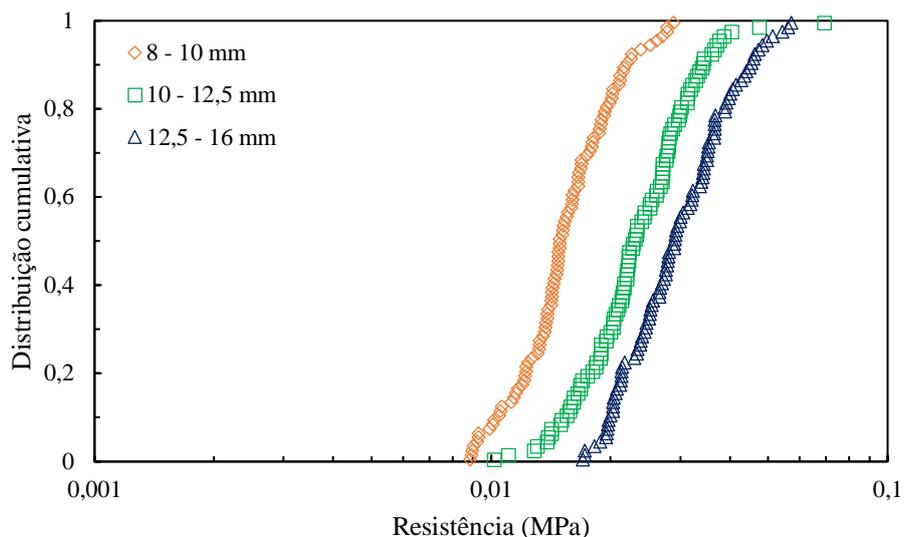


Figura 5.8 Distribuições de resistência à compressão de pelotas verdes para as diferentes faixas estudadas (10 mm/min)

Adicionalmente, foram analisadas as distribuições de energias específicas de fratura das pelotas (Figura 5.9) e rigidez (5.10) nas três faixas de tamanho. Observa-se que o tamanho não aparentou influenciar a energia gasta para fraturá-las, ou seja, a tenacidade das pelotas (Figura 5.9). Além disso, pelos resultados da rigidez de pelotas, é possível observar apenas um pequeno aumento dos valores para as pelotas na faixa de tamanho de 10-12,5 mm. Os valores medianos da rigidez de pelotas situam-se na faixa de 4,4 a 5,7 MPa.

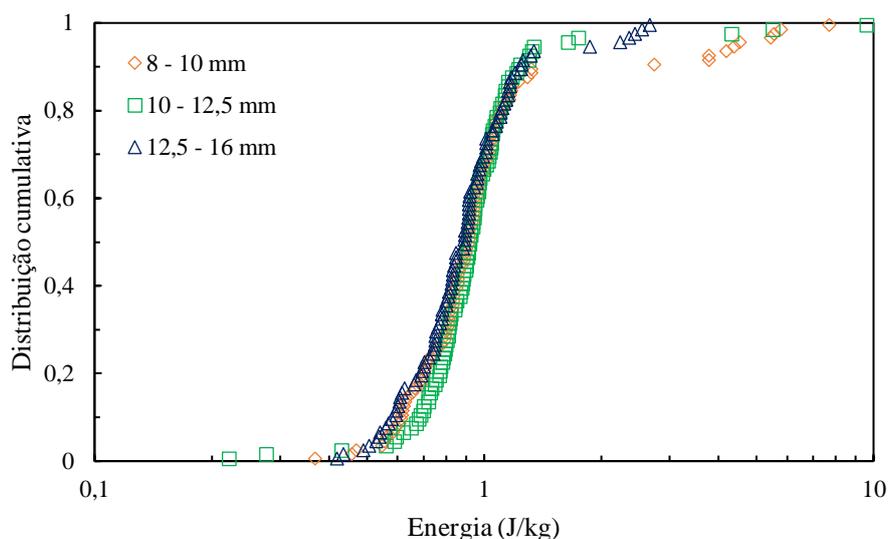


Figura 5.9 Resultados da energia específica de fratura por compressão para pelotas verdes para as diferentes faixas estudadas (10 mm/min)

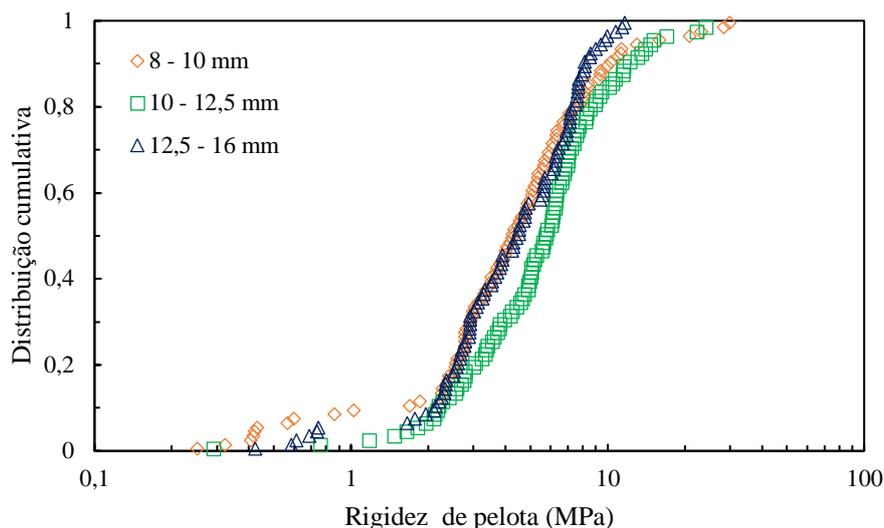


Figura 5.10 Resultados da rigidez por compressão para pelotas verdes para as diferentes faixas estudadas (10 mm/min)

5.1.4 Efeito da superfície de impacto

As pelotas foram submetidas a impactos em dois tipos de superfícies: aço e a borracha de polibutadieno utilizada na correia transportadora, que foi disponibilizada pela própria indústria.

A Tabela 5.2 mostra o módulo de elasticidade para cada material, e deixa bem evidente que o material mais rígido é o aço. Além disso, a comparação dos valores medianos de rigidez das pelotas contidas nas diferentes faixas de tamanhos (Figura 5.10) mostra que as pelotas apresentam rigidez comparável com o limite inferior da borracha.

Tabela 5.2 Propriedade dos materiais de superfície de impacto

Material de superfície	Módulo de elasticidade (E)
Aço	200 – 207 (GPa)
Borracha de polibutadieno	3,5 – 21 (MPa) ⁽¹⁾

Fonte: ⁽¹⁾ <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/borrachas/borrachas-sinteticas/borracha-de-polibutadieno-br/>

Pelotas contidas na faixa de tamanho de 10–12,5 mm foram impactadas nas duas superfícies e os resultados são apresentados na Figura 5.11. À medida que a altura aumentou, maior foi a degradação das pelotas, independentemente do tipo de superfície (Figura 5.11 b). Na menor altura de queda estudada (Figura 5.11 a), 25 cm, percebe-se a diferença da resistência das pelotas em função da superfície de impacto, como já observado por Sahoo (2007). Essa afirmação pode ser reforçada pela Figura 5.12 a qual apresenta os números de queda obtidos para cada tipo de material nas alturas testadas.

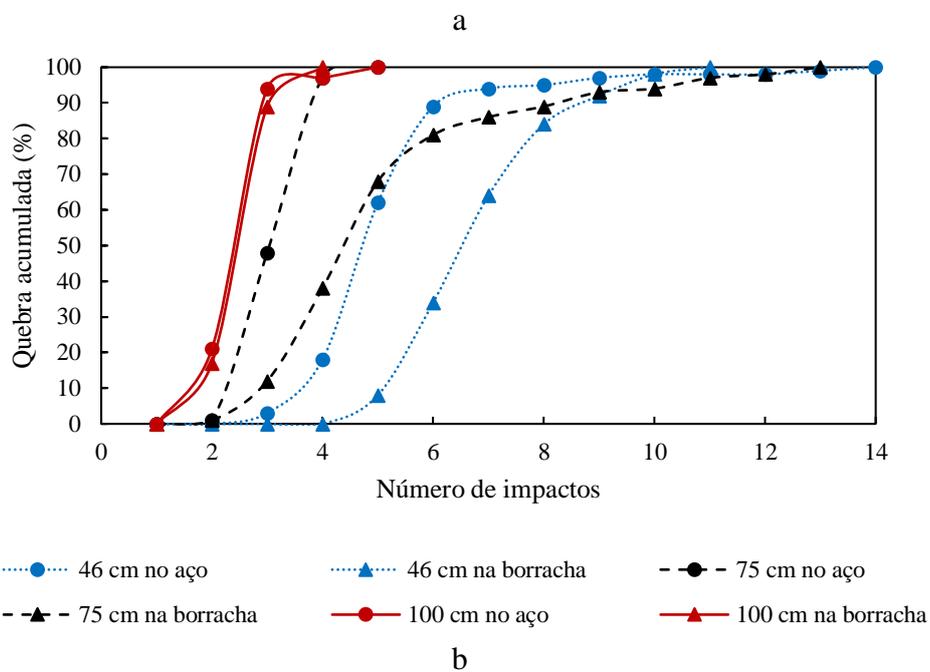
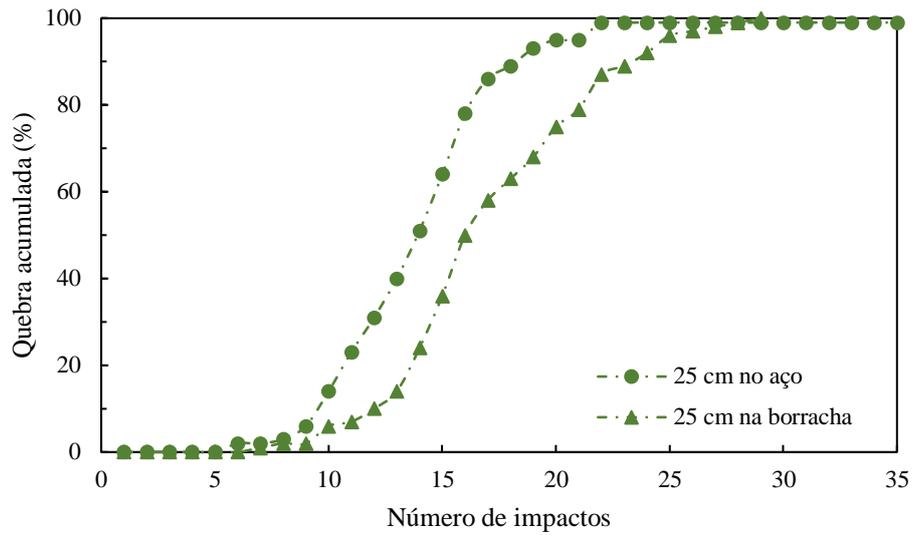


Figura 5.11 Efeito da superfície de impacto para fratura de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm nas diferentes alturas de queda: a) 25 cm; b) 46, 75 e 100 cm

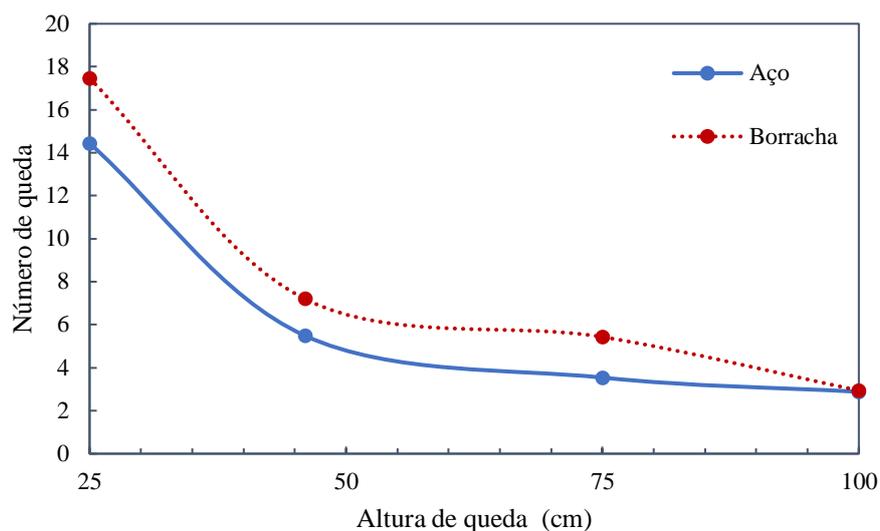
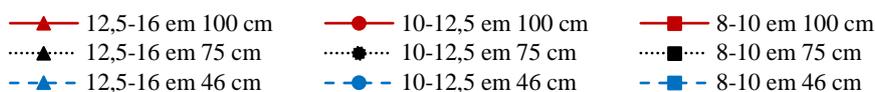
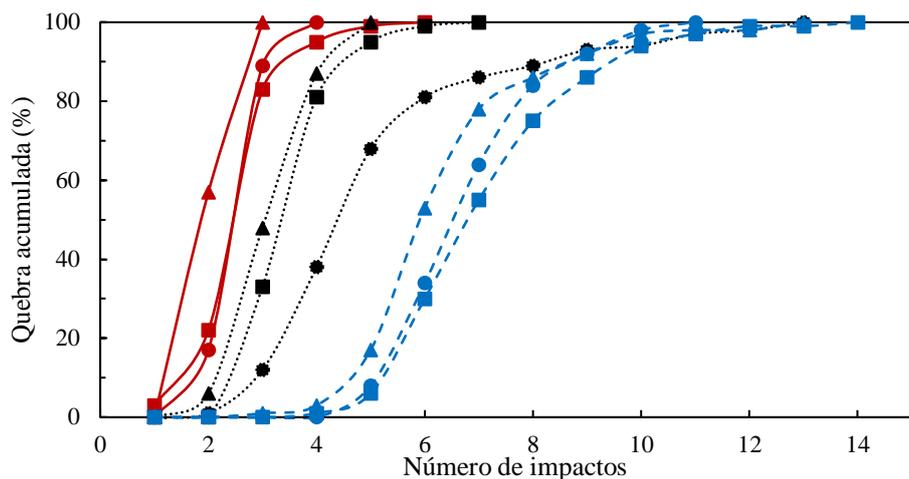


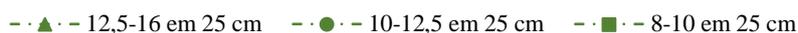
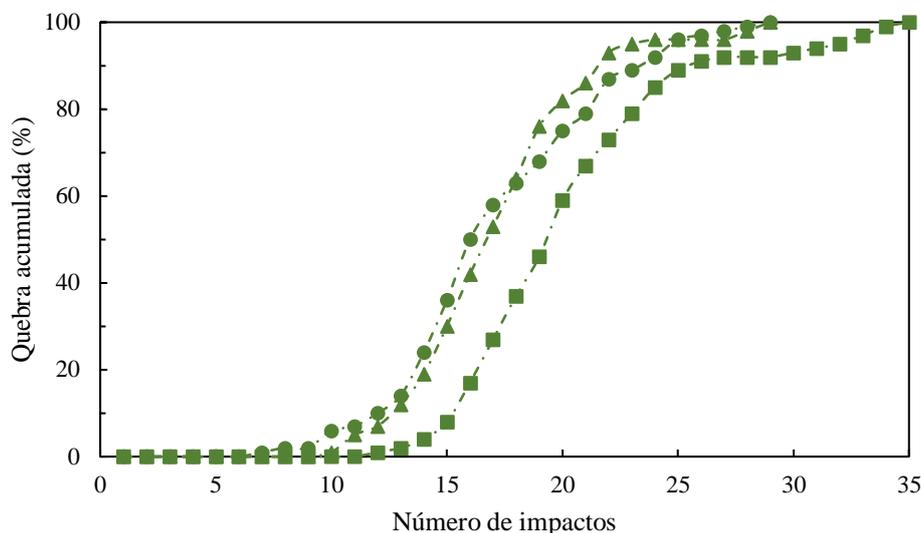
Figura 5.12 Número de queda para cada tipo de superfície para fratura de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm

É evidente que o número de queda foi mais alto quando pelotas foram impactadas contra borracha. Isso pode ser explicado pelos valores comparáveis de rigidez das pelotas verdes e os valores de módulo de elasticidade da borracha (Tabela 5.2), demonstrando que nos impactos quase metade da energia do impacto era dissipada na superfície de borracha.

Adicionalmente, analisando a influência da superfície de queda associado ao tamanho das pelotas, pode-se observar pela Figura 5.13 que, à medida que as alturas de queda aumentam o efeito do tamanho das pelotas se torna mais limitado também no caso da superfície de borracha (Figura 5.13 a). Além disso, na altura menor de impacto (25 cm), observa-se novamente o aumento da diferença de comportamento para as pelotas em função do seu tamanho (Figura 5.13 b).



a



b

Figura 5.13 Efeito do tamanho das pelotas verdes na proporção de pelotas fraturadas em função das alturas de queda na borracha: a) 46, 75 e 100 cm; b) 25 cm

5.1.5 Efeito do ângulo de impacto

A fim de estudar o efeito da componente tangencial no impacto, pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm foram impactadas na superfície de aço com angulação variada (Figura 5.14). Nota-se que para a altura de 25 cm a degradação aumenta uma vez que somente a componente normal está atuando (90°). Na medida que a componente tangencial no impacto aumenta, as pelotas suportam um maior número de impacto antes da quebra. O efeito da inclinação desaparece com o aumento da altura de queda, e consequentemente o número de queda diminui.

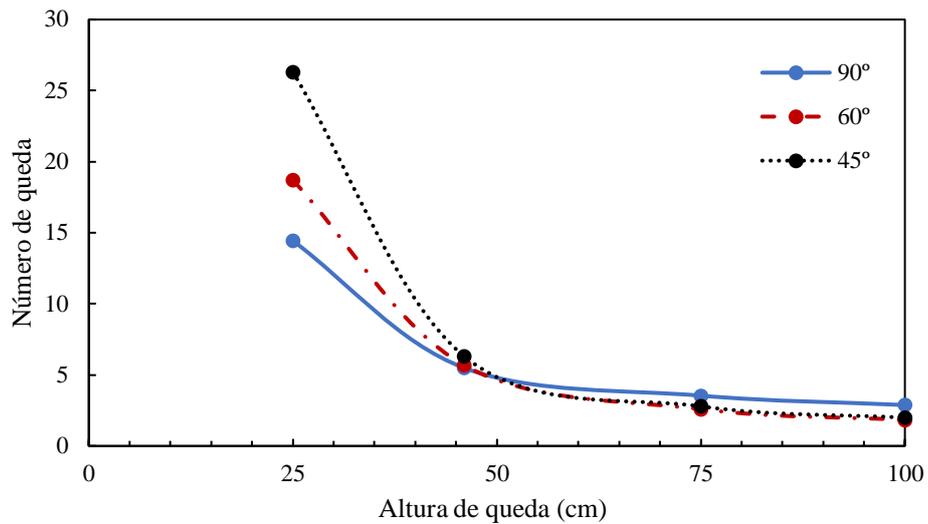
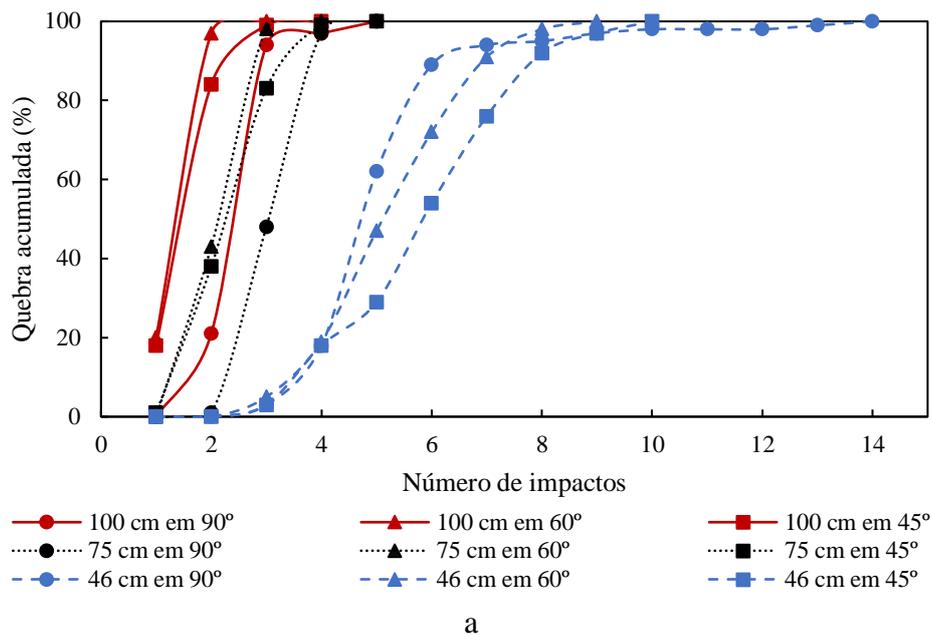
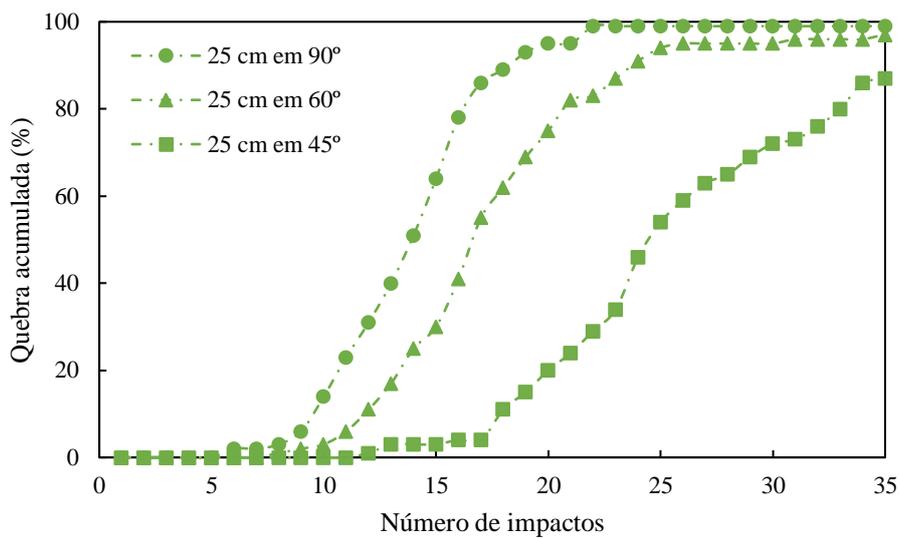


Figura 5.14 Resultados do número de queda para os ângulos de 45°, 60° e 90° em superfície de aço para pelotas verdes na faixa de 10-12,5 mm

Analisando as proporções de pelotas degradadas em relação ao tipo de superfície (Figura 5.15), observa-se que, para as maiores alturas, o efeito do ângulo não é muito explícito. Já para a menor altura (25 cm) (Figura 5.15 b), nota-se a influência do ângulo. Por exemplo, no 20º impacto 20% das pelotas quebraram na angulação de 45°, 75% no ângulo de 60° e 95% no de 90°.



a



b

Figura 5.15 Efeito do ângulo de impacto na proporção de pelotas fraturadas em função das alturas de queda na borracha: a) 46, 75 e 100 cm; b) 25 cm

5.1.6 Efeito da quantidade de bentonita

A Figura 5.16 apresenta os resultados da influência da quantidade do aglomerante bentonita em relação à resistência de pelotas contidas na faixa de 10 – 12,5 mm a impactos repetidos na altura de 46 cm, mantendo-se a umidade da pelota na faixa de 8 a 9%.

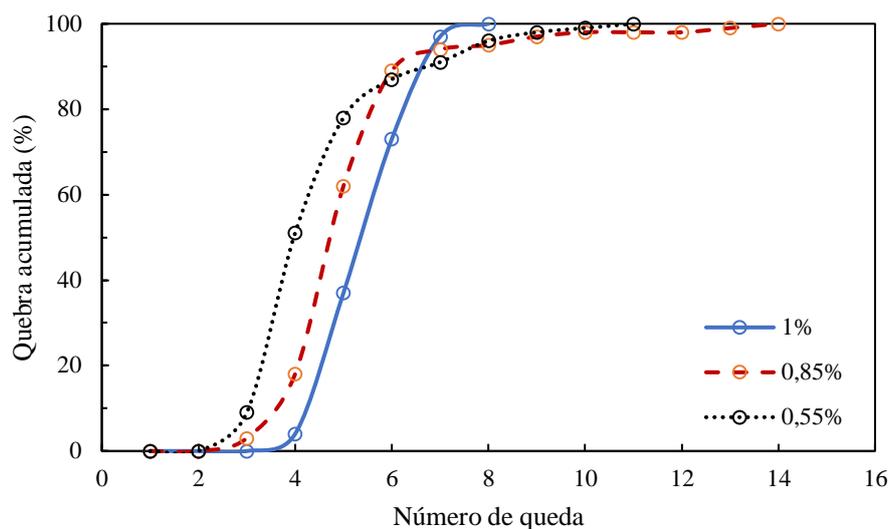


Figura 5.16 Efeito do teor de bentonita na formação das pelotas verdes na proporção de pelotas quebradas à altura de 46 cm (pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm)

Observando o 5º impacto, nota-se que a proporção de pelotas quebradas para o ensaio contendo a 0,55% de bentonita foi maior (78%), pois a baixa quantidade de aglomerante deixou as pelotas menos resistentes. Já a adição de 1% de bentonita resultou em pelotas mais resistentes, como esperado. Assim, o aumento do teor de bentonita de 0,55 para 1% resultou no aumento do número de queda de 4,9 para 5,9.

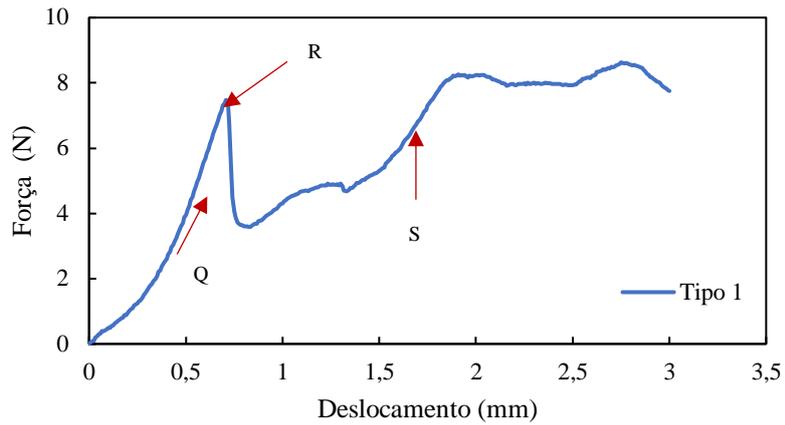
A quantidade necessária para obtenção do efeito aglomerante adequado na indústria é da ordem de 0,5–1,5% em peso (SIVRIKAYA e AROL, 2009). Para que as pelotas verdes produzidas no LTM conferissem resistência semelhante às da indústria, foi concluído por meio de inúmeros testes a necessidade do uso de 0,85% bentonita para formação das pelotas. A utilização de uma porcentagem de aglomerante pouco maior do que a aplicada industrialmente, pode ser devido as dimensões do misturador e o procedimento utilizado na produção das pelotas.

Vale ressaltar, entretanto, que o excesso de bentonita deve ser evitado devido ao fato que ela introduz contaminantes indesejáveis (sílica e alumina), que além de reduzirem o percentual de ferro da pelota, causam o aumento do volume de escória. Além disso, a maior plasticidade dessas pelotas pode resultar em seu amassamento no interior de fornos de endurecimento, o que pode acarretar numa diminuição da permeabilidade do forno e aumento da perda de carga no forno (SILVA *et al.*, 2018).

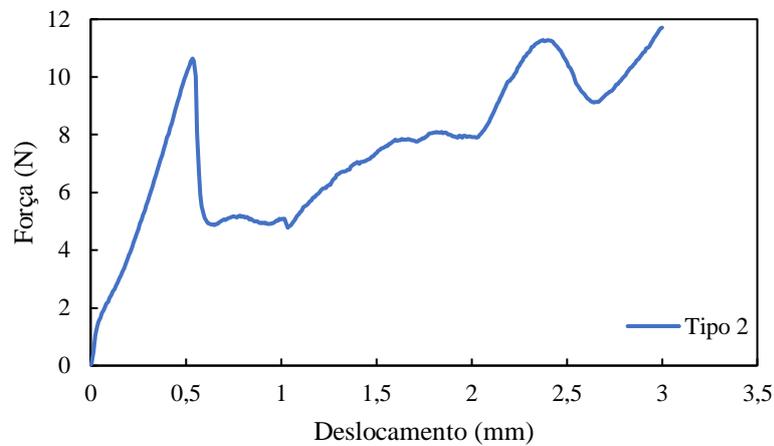
5.1.7 Efeito da velocidade de carregamento

Durante o manuseio e transporte no interior da usina de pelletização, as pelotas verdes são expostas a diferentes situações de carregamento estático a dinâmico, resultando em degradação da sua resistência mecânica. A fim de avaliar este fenômeno, um estudo sobre a influência das velocidades de carregamento foi realizado. Tendo em vista o fato que não há como desacoplar os efeitos da velocidade de carregamento e da energia de impacto em ensaios de queda, foram empregados ensaios de compressão e impacto duplo para investigar esse efeito. Assim, além dos resultados do teste de compressão seguindo a ISO 4700 (velocidade de avanço de 10 mm/min e deslocamento de 3 mm), foram realizados ensaios com variação da taxa de avanço do pistão em uma velocidade baixa de 1 mm/min e na velocidade máxima que o pistão atinge de 500 mm/min. Adicionalmente, foram realizados ensaios de queda de peso à velocidade de 1,4 m/s.

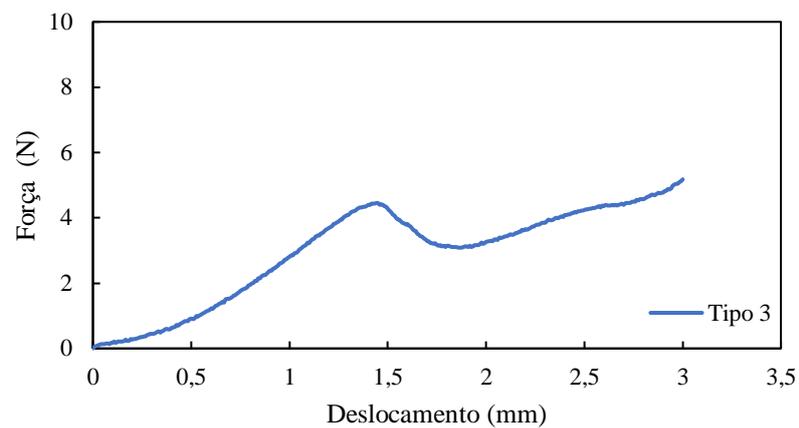
Durante a execução dos ensaios observou-se que o comportamento de deformação das pelotas variou de acordo com a velocidade de carregamento. Observou-se três tipos predominantes de diagramas de força “versus” deslocamento, relacionados à dissipação de energia durante a compressão individual desses grânulos, os quais são ilustrados na Figura 5.17.



a



b



c

Figura 5.17 Curvas de força “versus” deslocamento predominantes do teste de compressão: a) tipo 1; b) tipo 2; c) tipo 3

O tipo 1 (Figura 5.17 a) é o que ocorre mais frequentemente entre os demais, podendo ser considerado o comportamento de quebra típico das pelotas estudadas. O ponto de ruptura ou de aparecimento da primeira trinca, ponto R, se mostra bem definido,

indicando o instante em que o dano acumulado atinge a superfície do material, ou seja, a força de ruptura necessária para que a trinca se propague até a superfície gerando a ruptura da pelota. Em seguida, observa-se queda brusca da curva no gráfico, indicado pelo ponto Q. Como se trata de um material que não é perfeitamente frágil, sabe-se que o mesmo ainda não perdeu inteiramente a integridade, por isso o gráfico possui essa continuidade indicada pela região S até o final do deslocamento, mostrando alguma capacidade dos fragmentos de suportar esforços.

O tipo 2, representado pela Figura 5.17 b, mostra-se semelhante ao tipo 1, com a diferença no início do perfil da curva, no qual a pelota apresenta um comportamento inicialmente evidenciando uma tensão de escoamento, como aquela observada em fluidos plásticos de Bingham.

O tipo 3 (Figura 5.17 c), por outro lado, não apresenta nenhuma das regiões definidas. Ele permite identificar o ponto de aparecimento de uma trinca predominante, porém este não é tão bem definido como no tipo 1. Essa é uma pelota que demonstra um comportamento fortemente plástico durante todo o carregamento.

Ainda que não sejam claros os motivos do aparecimento desses distintos comportamentos durante a deformação de pelotas, foi estimada a proporção de cada tipo de perfil em função da velocidade de carregamento na Tabela 5.3. A tabela ainda apresenta os valores médios de força de ruptura para cada velocidade de carregamento estudada.

Tabela 5.3 Classificação dos tipos de curva de força versus deslocamento para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm para diferentes taxas de carregamento

Teste de Compressão		Proporção (%)		
Velocidade de Carregamento	Força de trincamento (N)	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
1 mm/min	5,0	42	12	46
10 mm/min	8,4	31	24	45
500 mm/min	10,5	0	0	100

A Tabela 5.3 sugere que o comportamento geral de deformação varia em função da velocidade de carregamento. Em todas as velocidades observou-se que pelo menos 45% das pelotas apresentaram comportamento essencialmente plástico, ou seja, do tipo 3. A proporção de pelotas com curvas de força “versus” deformação que se enquadraram

no tipo 1, ou seja, aquele que se aproxima do comportamento frágil, diminuiu de 42% para a menor velocidade de carregamento, para zero, no caso da maior velocidade de carregamento estudada. A tabela ainda mostra que a força média de trincamento das pelotas aumentou de forma significativa com a velocidade de carregamento.

Dando continuidade ao estudo da influência do efeito da velocidade de carregamento na degradação das pelotas verdes, os resultados gerados nos ensaios de compressão, e os dados obtidos nos testes de impacto duplo realizados na Célula de Carga de Impacto (CCI), foram comparados aos resultados gerados pelos testes de queda à diferentes alturas, como mostra a Figura 5.18.

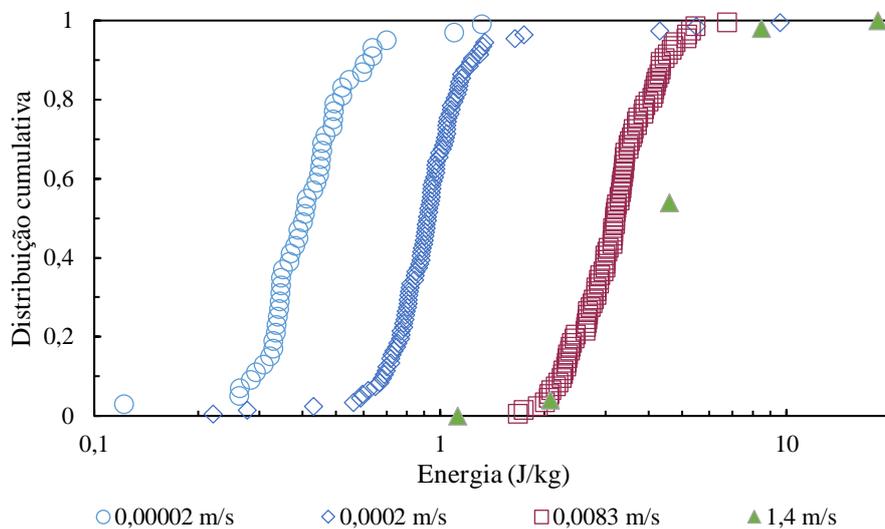


Figura 5.18 Efeito da velocidade de carregamento na proporção de pelotas trincadas para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm

É possível observar claramente o aumento na tenacidade das pelotas à medida que se aumentou a velocidade de carregamento. No entanto, estes testes captam somente o aparecimento de trinca e não a desintegração total das pelotas.

A inspeção visual das pelotas durante os ensaios se mostrou útil para avaliar o seu comportamento durante o carregamento. Por exemplo, no teste de compressão com máxima velocidade do pistão (500 mm/min), a deformação da pelota ocorre tão rapidamente de tal maneira que não é possível identificar o momento de trinca. A sequência de imagens do teste de compressão (Figura 5.19), juntamente com o gráfico de força versus deslocamento (Figura 5.20), ilustram esse efeito. No primeiro momento a pelota intacta (Figura 5.19 a) sofre o esforço rápido do pistão que a esmaga gerando um

dano bastante significativo (Figura 5.19 b). Por fim, a pelota esmagada, ainda que íntegra devido à sua plasticidade, já apresenta uma trinca substancial após o deslocamento total do pistão (Figura 5.19 c).

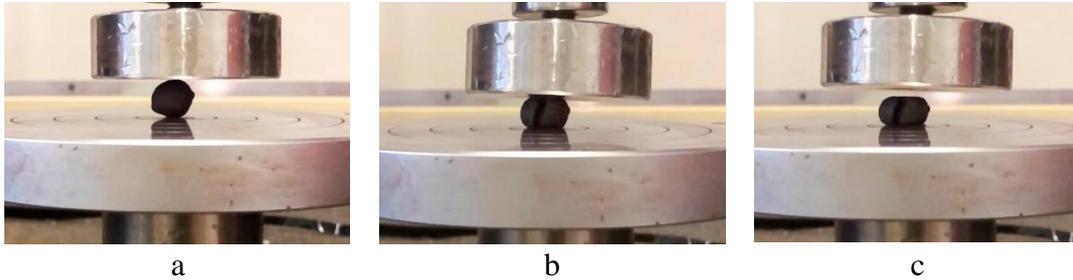


Figura 5.19 Sequência de compressão em velocidade máxima (500 mm/min) de uma pelota verde na faixa de 10 – 12,5 mm

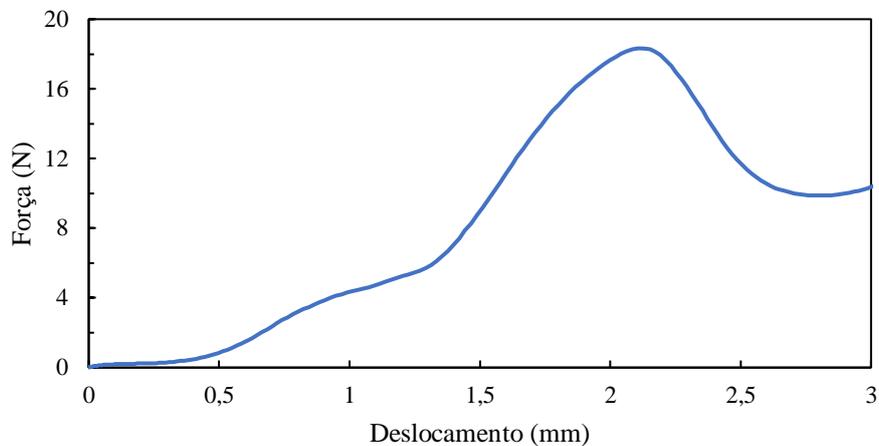


Figura 5.20 Curva de força “versus” deslocamento em velocidade máxima (500 mm/min) para uma pelota verde na faixa de 10–12,5 mm

Na velocidade mínima, o carregamento torna possível acompanhar a propagação do dano até atingir a superfície da pelota, como pode ser visto na sequência de imagens da Figura 5.21. A pelota encontra-se intacta no início do teste (Figura 5.21 a). Após o início do deslocamento do pistão é possível identificar o aparecimento de uma pequena fissura na superfície da pelota (5.21 b) e, ao final do teste, a pelota encontra-se com um dano maior, porém não há desintegração total da mesma (Figura 5.21 c). A partir da análise da curva de força “versus” deslocamento (Figura 5.22) pode se observar que a identificação do ponto de ruptura (trinca) é mais clara comparado aquele observado no carregamento rápido.

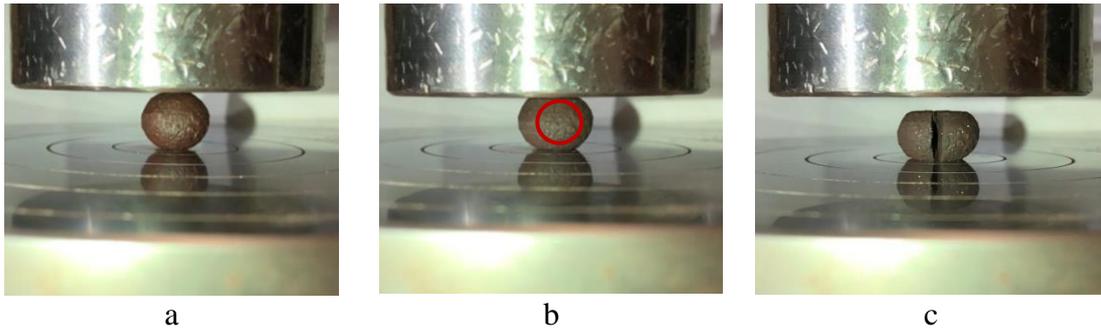


Figura 5.20 Sequência de compressão em velocidade baixa (1 mm/min) de uma pelota verde na faixa de 10–12,5 mm

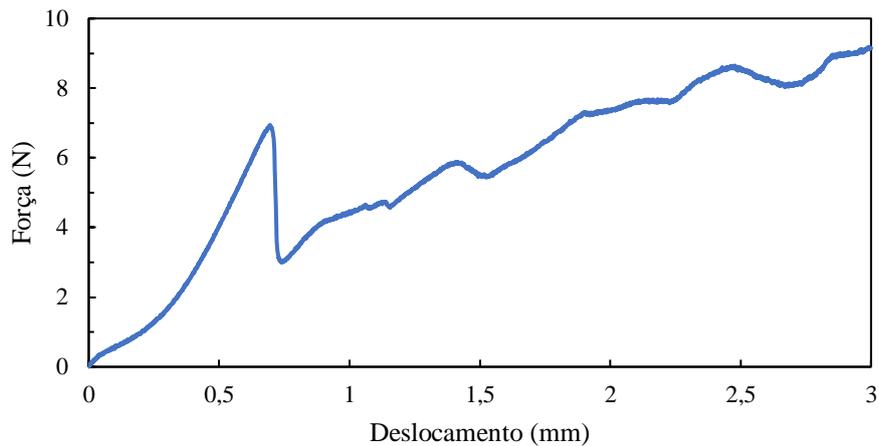


Figura 5.21 Curva força “versus” deslocamento em velocidade baixa (1 mm/min) para uma pelota na faixa de 10–12,5 mm

O pico mais alto na curva força “versus” deformação (Figura 5.22) representa o instante no qual a trinca (área circulada na Figura 5.21 b) se propaga na superfície da pelota. Logo em seguida, vem a queda no gráfico interpretando que, com a propagação da trinca, a pelota perdeu parcialmente sua capacidade de resistir aos esforços. Como se trata de um material plástico, o pistão continua exercendo esforço e então os dados ainda são captados pelo sistema ao longo do percurso de deslocamento do pistão até o deslocamento máximo estabelecido (3 mm).

5.1.8 Efeito da energia específica de impacto

Como o presente trabalho trata do estudo das condições que resultam na degradação mecânica das pelotas, analisam-se a seguir os resultados dos ensaios nos quais pelotas foram submetidas a esforços mais rápidos de carregamento na CCI. Infelizmente, a baixa resistência das pelotas impediu o registro das forças e deformações, as quais poderiam ter sido medidas no aparelho (TAVARES e KING, 1998). Esses testes foram realizados fixando-se a velocidade de impacto em 1,4 m/s, registrando-se a proporção de

pelotas trincadas e fraturadas após impactos sucessivos. Com isso, foi possível analisar a influência isolada da velocidade de impacto no trincamento e quebra de pelotas. A Figura 5.22 mostra a porcentagem de pelotas fraturadas em função da energia de impacto, representado pelo aumento da massa da esfera de aço usada no impacto. Como é de conhecimento, as pelotas por serem de alta plasticidade enquanto verdes, têm baixa resistência a este tipo de ensaio. A sequência de imagens da Figura 5.23, pode ilustrar esta afirmação.

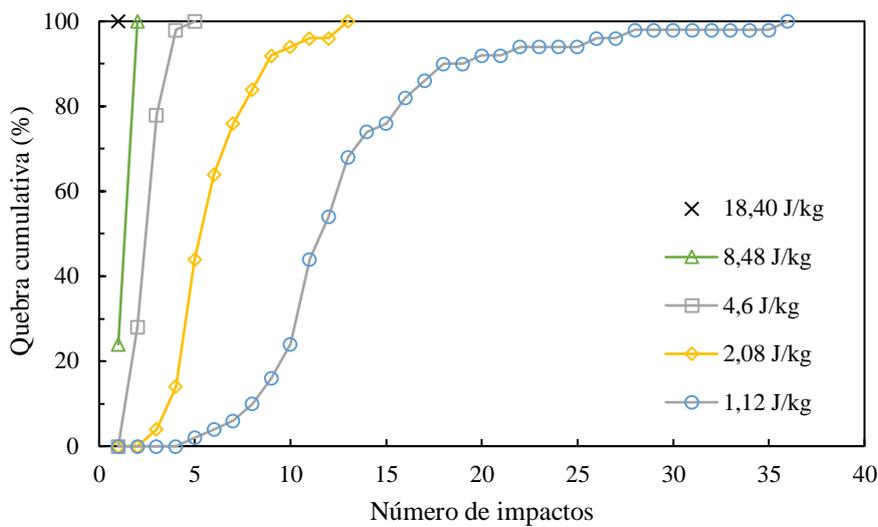


Figura 5.22 Proporção de pelotas fraturadas a uma velocidade de impacto de 1,4 m/s na Célula de Carga de Impacto (CCI) com diferentes tamanhos de impactores para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm

A Figura 5.23 a representa o instante no qual a pelota é posicionada na célula de carga para início do teste. Logo em seguida o impactor de 8,48 J/kg é solto sob a pelota verde gerando uma trinca superficial como indicado na Figura 5.23 b, por fim, após o terceiro impacto a pelota sofre total desintegração, como mostra a Figura 5.23 c.

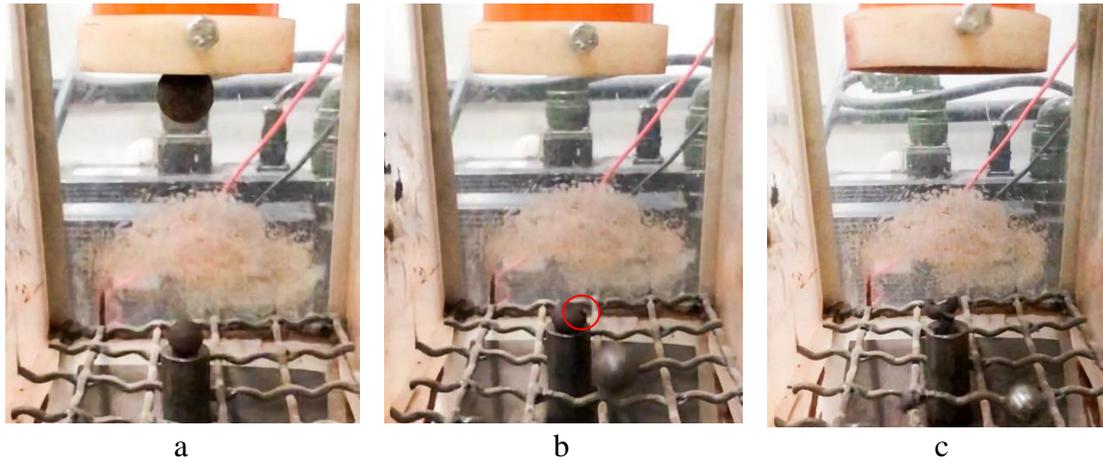


Figura 5.23 Sequência de imagens do teste da Célula de Carga de Impacto com energia específica de 8,48 J/kg: a) antes do primeiro impacto; b) após o primeiro impacto; c) desintegração total da pelota

5.2.IMPLICAÇÕES DO DANO ÀS PELOTAS VERDES EM SUA RESISTÊNCIA APÓS ENDURECIMENTO

Sabe-se que as pelotas não podem ser estocadas e comercializadas enquanto ainda verdes ou cruas. Portanto o tratamento térmico é necessário para garantir resistência até a sua entrega aos clientes. Simulando a degradação sofrida durante o seu manuseio e transporte, o procedimento descrito na seção 4.7 foi realizado no tratamento térmico das pelotas verdes. A força média de ruptura das pelotas intactas ficou em torno de 264,4 kg/pelota, o que é comparável com a resistência de pelotas queimadas industriais (MEYER, 1980; CAVALCANTI e TAVARES, 2018).

A resistência mecânica das pelotas queimadas intactas, bem como aquelas que foram submetidas a quatro impactos na altura de 46 cm, foi medida pelo teste de compressão, seguindo a ISO 4700 e está representada pela Figura 5.24.

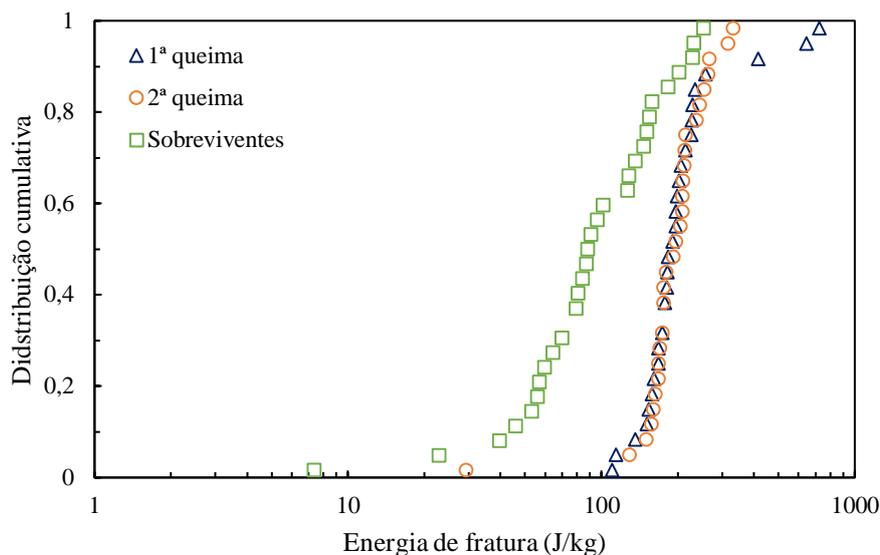


Figura 5.24 Resultados de energia de fratura por compressão para pelotas queimadas intactas (réplicas relativas à 1ª e 2ª queima) e as pelotas submetidas a quatro impactos de 46 cm (sobreviventes)

A energia mediana de fratura para as pelotas submetidas à primeira queima foi de 225,2 J/kg, muito próximo do resultado obtido na segunda queima (231,4 J/kg). Por outro lado, a energia mediana de fratura das pelotas após os quatro impactos foi reduzida significativamente para 108,3 J/kg. Isso mostra que as quedas sofridas durante o manuseio e transporte das pelotas enquanto verdes implicam na sua degradação posterior ao tratamento térmico, deixando-as menos resistentes e mais suscetíveis a quebra. Conforme havia sido observado na Figura 5.3, quando submetidas a quatro impactos de 46 cm, nenhuma pelota havia fraturado, mas quase a totalidade (93%) das pelotas sofreram trincamento. Esta afirmação pode ser confirmada pelos resultados de resistência (Figura 5.25), que mostra um deslocamento bastante claro de toda a distribuição para valores mais baixos.

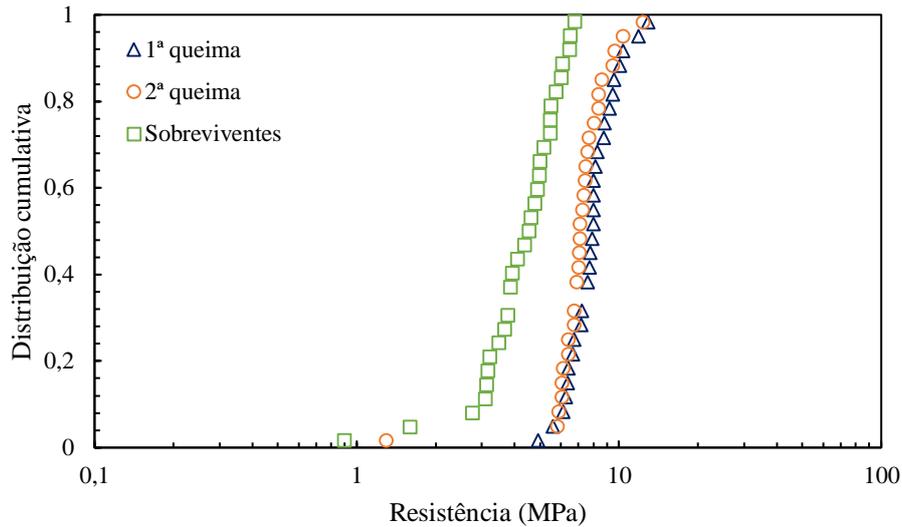


Figura 5.25 Resultados de resistência por compressão para pelotas queimadas intactas e sobreviventes

Além das resistências e das energias específicas de fratura, foram calculados os valores de rigidez (Figura 5.26). A diferença mais importante entre as intactas e aquelas que sofreram impactos previamente à queima é que a proporção de pelotas com baixa rigidez foi significativamente maior no caso das últimas. Tavares e King (1999) e Tavares (2005) associaram a redução da rigidez à presença de trincas (dano) nas partículas, o que é provavelmente o caso desses resultados.

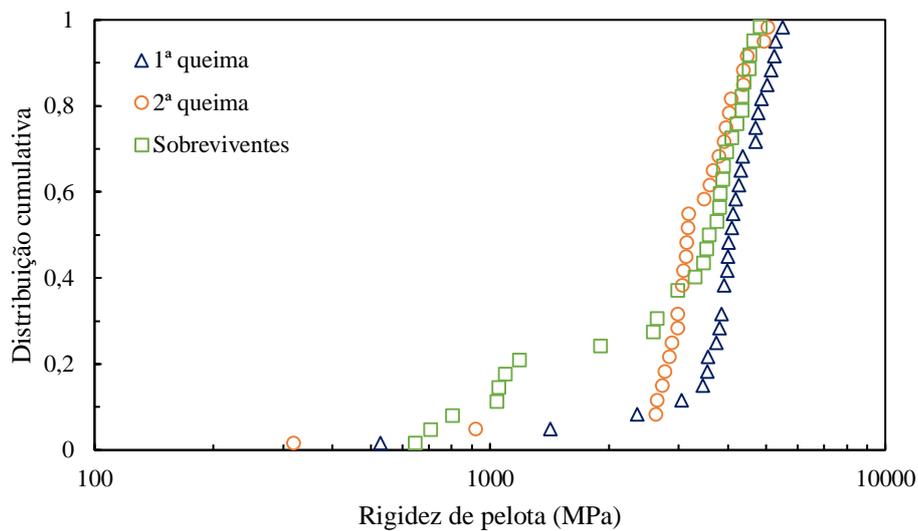


Figura 5.26 Resultados da rigidez por compressão para pelotas queimadas intactas e sobreviventes

5.3.DISSCUSSÃO

De acordo com o *layout* de um circuito de indústria produtora de pelotas (Figura 3.19), sabe-se que a altura total de pontos de transferência, ou seja, a altura total de queda é de 3,2 m. A Figura 5.27 mostra a quebra cumulativa das pelotas verdes em relação à altura cumulativa de queda para impactos simples (queda) de pelotas contidas na faixa 10–12,5 mm no aço. Os resultados mostram claramente que na altura menor (25 cm) e na alternância de altura com 20 choques iniciais à 15 cm e posterior queda à 100 cm até a fratura, as pelotas resistem significativamente até a altura total de queda presente na usina. Assim, a intensidade de degradação das pelotas pode ser reduzida significativamente, substituindo uma queda maior por uma série de quedas menores, convergindo com o estudo feito por Sahoo (2007). Além disso, pode-se notar o aparecimento de uma curva única de comportamento de quebra do material, na qual para que pelotas comecem a fragmentar é necessário entre 1,0 e 1,2 metros de altura total de queda, desde que os impactos tenham altura igual ou superior a 25 cm.

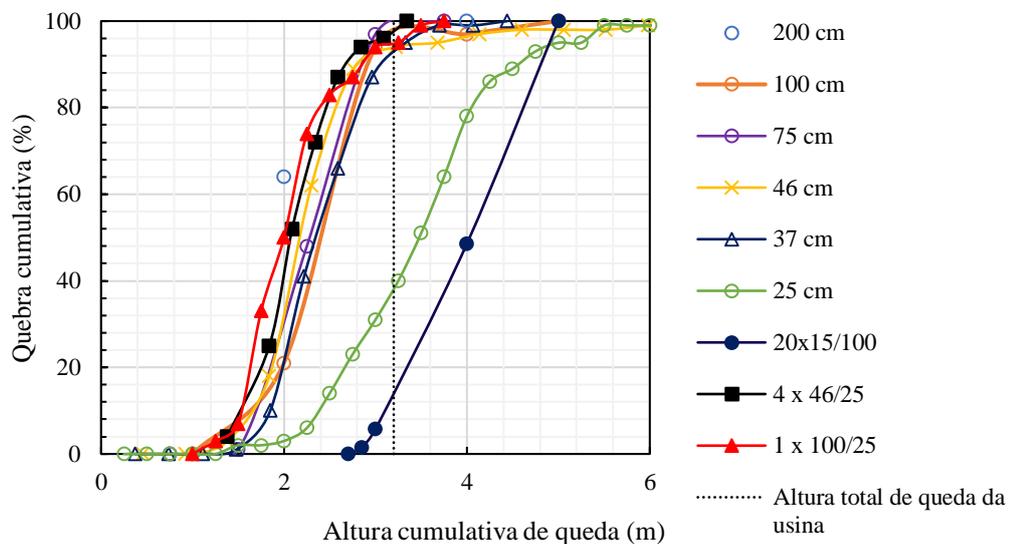


Figura 5.27 Quebra cumulativa das pelotas verdes em relação à altura cumulativa de queda para impactos simples de pelotas contidas na faixa 10–12,5 mm

Análogo ao impacto simples, para o impacto duplo também é necessário um mínimo de energia (4,5 J/kg) para ativação do dano, conforme mostra a Figura 5.28 relacionando a quebra cumulativa das pelotas verdes à energia cumulativa de impacto em

impacto duplo. Nesse caso, observa-se também que as pelotas resistiram mais a impactos na energia de impacto de 1,12 J/kg.

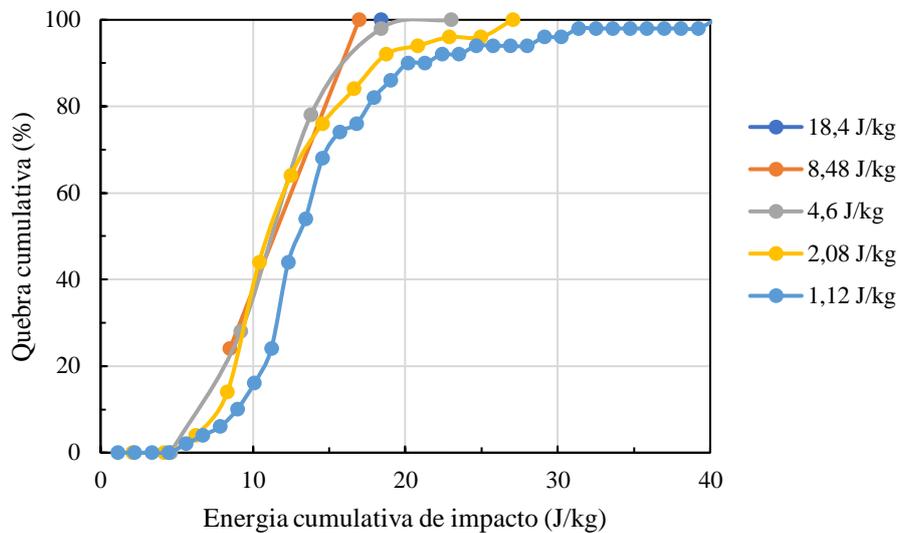


Figura 5.28 Quebra cumulativa das pelotas verdes em relação à energia cumulativa de impacto para impacto duplo de pelotas contidas na faixa 10–12,5 mm

Ao comparar o efeito do tipo de carregamento, impactos simples versus duplo, nota-se uma maior severidade do impacto duplo na degradação das pelotas. Por exemplo ao analisar as curvas referentes à altura de 1 m (Figura 5.27) e a energia de impacto equivalente de 10 J/kg (Figura 5.28), nota-se que para o impacto simples nenhuma pelota é fragmentada enquanto para o impacto duplo aproximadamente 40% das pelotas fragmentam. Essa diferença decorre da característica de cada teste: no impacto simples há variação da região de contato da pelota com a superfície de impacto, devido à aleatoriedade dessa na colisão da pelota contra a superfície, o que pode contribuir para o fechamento de trincas que tenham sido induzidas. Já no impacto duplo, a região de contato da pelota com o impactor se mantém constante, potencializando a fratura.

Tendo em vista que os principais efeitos ocorrem na menor altura de impacto (25 cm), a pergunta a ser respondida é a quantidade de energia necessária para fraturar as pelotas. A Figura 5.29 relaciona o número de queda médio com cada altura de impacto no aço e expressa um valor de altura média total. Nota-se que para impactos com altura inferior a 37 cm, uma distância maior teria que ser percorrida para que 100 % das pelotas fossem quebradas ou trincadas. À medida que a altura de impacto aumenta a altura média de queda no aço se mantém aproximadamente constante.

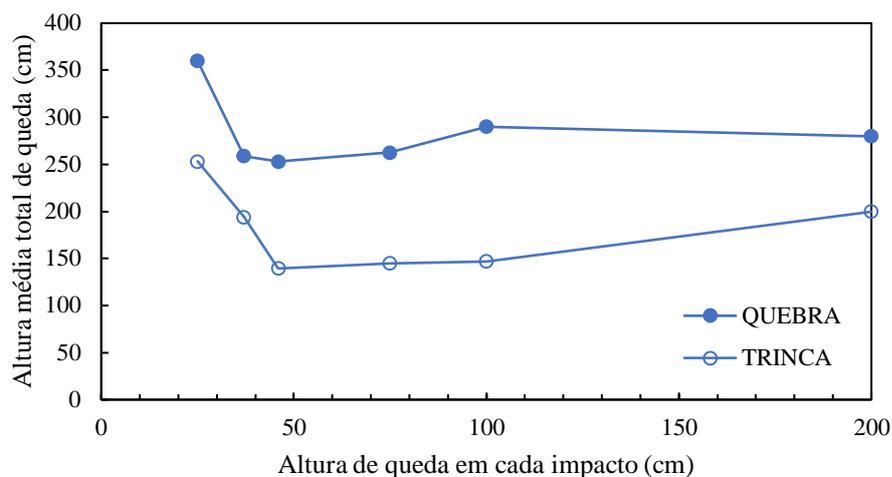


Figura 5.29 Número médio de queda em relação a altura de queda em cada impacto no aço

Por se tratar de um material de comportamento de fratura complexo e com característica plástica, o entendimento do seu comportamento de fratura ainda é um desafio. Quando a pelota úmida sofre algum tipo de esforço, ela pode apresentar trincas visíveis ou não. Mas um dano interno é acumulado até o ponto em que ocorre a ruptura superficial da pelota. Os ensaios realizados no presente trabalho podem ser analisados a partir do estudo de Salman *et al.* (2004), o qual apresentou uma classificação descritiva das formas de fratura por impacto de partículas esféricas. Apesar de seus grânulos úmidos terem sido produzidos a partir de carbonato de cálcio, usando polietileno glicol como aglomerante, e submetidos a impactos simples usando uma pistola de gás, pode ser estabelecida uma analogia das formas de fratura desse tipo de material com as pelotas verdes ao sofrerem impactos de baixa (Figura 5.30), intermediária (Figura 5.31) e alta energia (Figura 5.32) durante os ensaios realizados no presente trabalho.

De acordo com a Figura 5.30, exatamente como no estudo de Salman *et al.* (2004), foi observada deformação plástica, resultando no achatamento da região de impacto da pelota verde, causando a propagação de pequenas fissuras na área de contato deformada. Apesar de um pequeno aumento da energia em direção ao regime intermediário, o comprimento e o número de trincas aumentam, mas a integridade das pelotas ainda foi mantida.

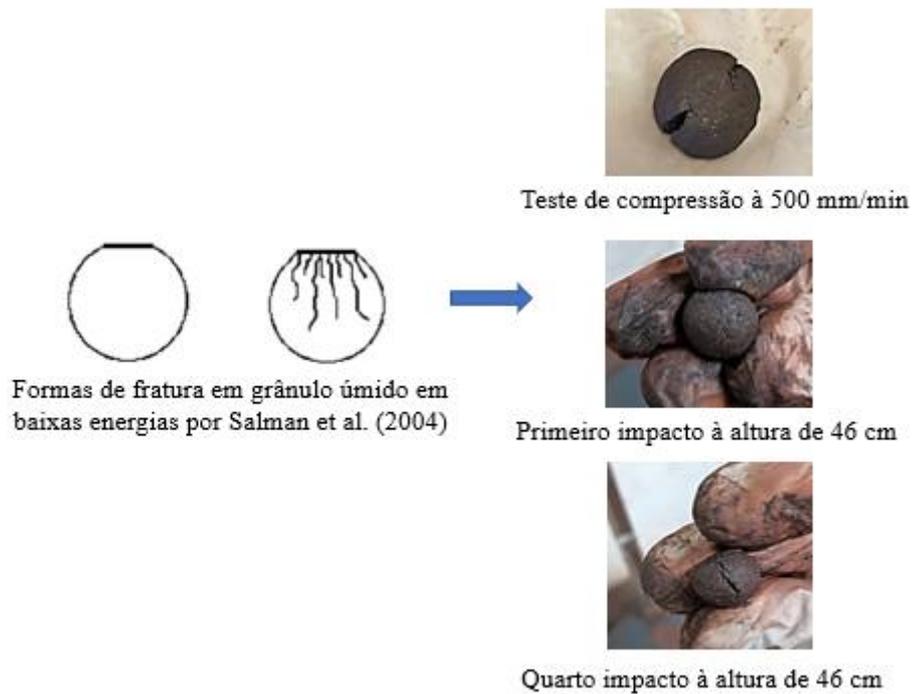


Figura 5.30 Comparação do estudo de Salman *et al.* (2004) (esquerda) para regime de fratura à baixas energias com os ensaios realizados no presente trabalho (direita)

No regime intermediário (Figura 5.31) e de alta energia (Figura 5.32) observa-se a desintegração total da pelota, porém destacando um fragmento com grande área de contato.

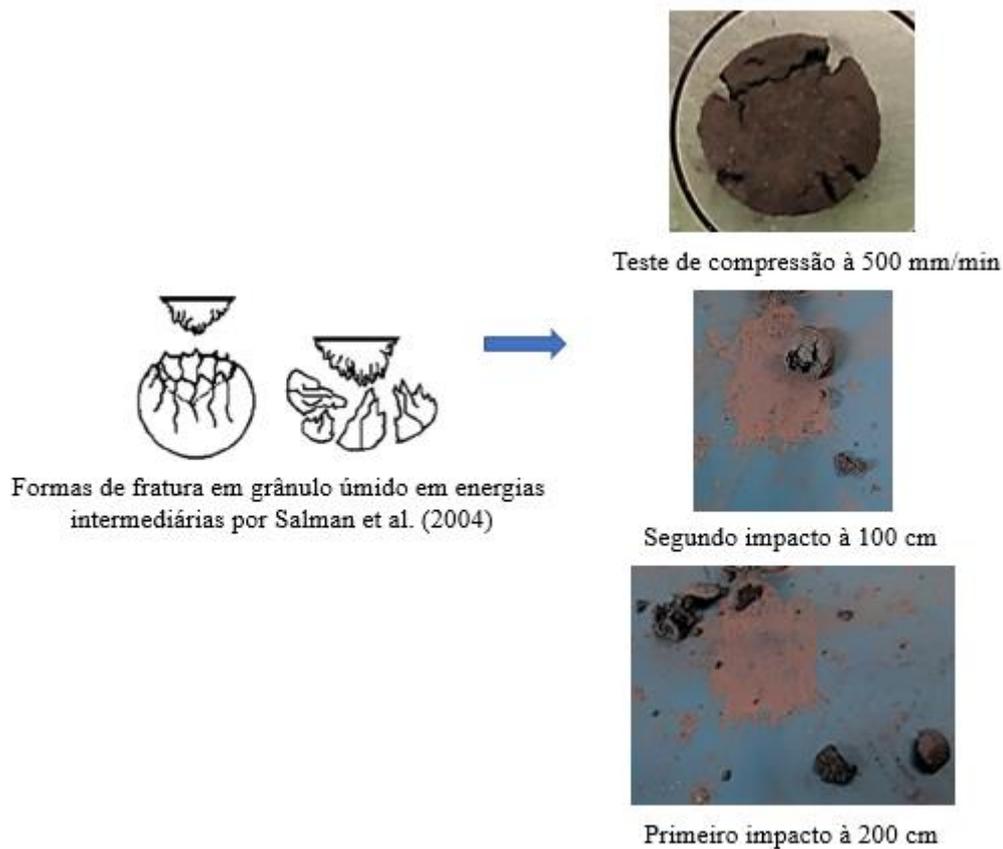


Figura 5.31 Comparação dos estudos de Salman *et al.* (2004) (esquerda) para regime de fratura a energias intermediárias com os ensaios realizados no presente trabalho (direita)

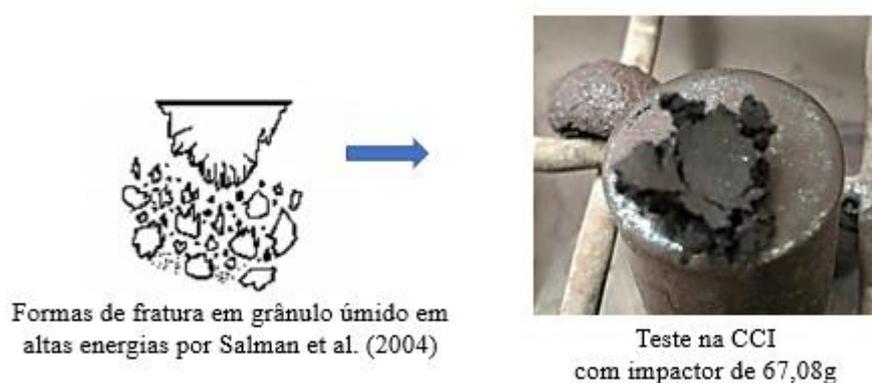


Figura 5.32 Comparação dos estudos de Salman *et al.* (2004) (esquerda) para regime de fratura à altas energias com os ensaios realizados no presente trabalho (direita)

A Figura 5.33 relaciona a energia mediana de trincamento em relação à velocidade de carregamento para os ensaios à compressão lenta nas três velocidades (1 mm/min, 10 mm/min e 500 mm/min) e impacto duplo na CCI. Observa-se que em baixas velocidades de carregamento, necessita-se de baixa energia para causar danos as pelotas, ou seja, quanto maior a velocidade de carregamento, mais resistentes ao dano são as pelotas. Por exemplo, na compressão lenta é necessário menor energia para causar dano inicial à pelota, ou seja, elas são menos resistentes a este tipo de esforço, já no impacto duplo, as pelotas necessitam de maior energia para ativação do dano. Pode-se então sugerir que há chance de danos serem introduzidos, sobretudo às pelotas posicionadas nas camadas mais profundas do leito, durante a secagem no forno de endurecimento.

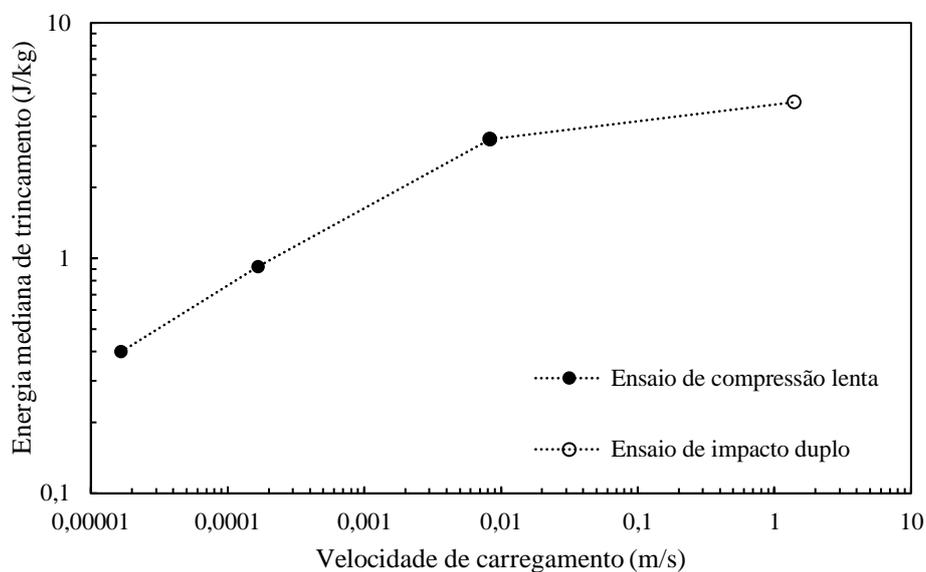
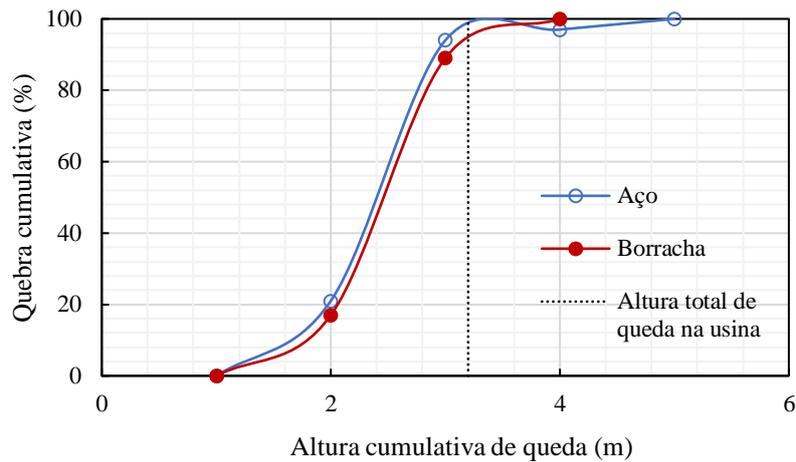
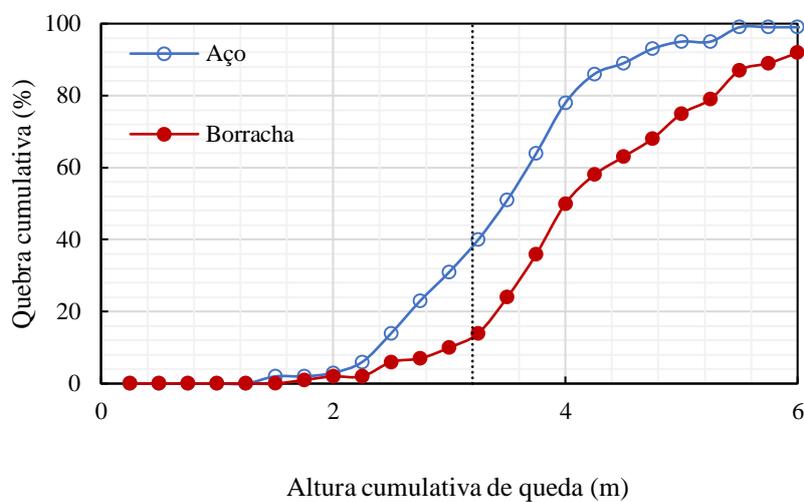


Figura 5.33 Energia mediana de trincamento em relação à velocidade de carregamento

Ao alterar a superfície de queda, analisa-se a altura cumulativa de queda em relação à quebra acumulativa (Figura 5.34) em condições extremas analisadas: nas alturas de 100 cm (Figura 5.34 a) e 25 cm (Figura 5.34 b). Observa-se que para maior altura, a mesma altura cumulativa para ambas as superfícies é necessária para início da fragmentação das pelotas, de maneira que o efeito da superfície de impacto se mostrou secundário. Já para a menor altura, a mesma altura total também é necessária para início da fragmentação das pelotas, porém a borracha tende a diminuir a degradação devido ao fato que parte da energia de impacto também ser absorvida pela superfície.



a



b

Figura 5.34 Quebra cumulativa das pelotas verdes contidas na faixa 10–12,5 mm em relação à altura cumulativa de queda para cada tipo de superfície de pelotas nas alturas extremas a) 100 cm b) 25 cm

A Figura 5.35 apresenta o efeito do ângulo de impacto na fragmentação das pelotas verdes. Observa-se que a maiores alturas de queda (100 e 75 cm), fragmentação marginalmente mais intensa ocorreu com o ângulo de 60° em comparação aos demais. No caso das menores alturas (37 e 25 cm), por outro lado, a redução do ângulo de impacto resultou na diminuição da intensidade da fragmentação, conforme já observado em estudos anteriores para pelotas queimadas (TAVARES et al., 2018). Esse comportamento pode ser analisado à luz das componentes da velocidade de queda e, conseqüentemente, da energia de impacto. No caso do impacto normal, a totalidade da energia de impacto corresponde à energia na direção normal. Por outro lado, essa componente normal reduz para 75% e 50%, para os ângulos de 60 e 45°, respectivamente, sendo o complemento

representado pela componente tangencial da energia de impacto. Assim, pode-se inferir que a proporção de 25% da energia tangencial foi responsável pelo maior dano às pelotas, demonstrando que ela tende a mais facilmente induzir dano por tração às pelotas. No caso do impacto a 45°, a redução da componente normal da energia de impacto resultou na diminuição da severidade do impacto, mesmo com o aumento da componente tangencial, mas ainda assim sendo responsável por induzir maior dano que o impacto normal. Esses resultados demonstram a complexidade da resposta mecânica de pelotas verdes ao carregamento por impacto.

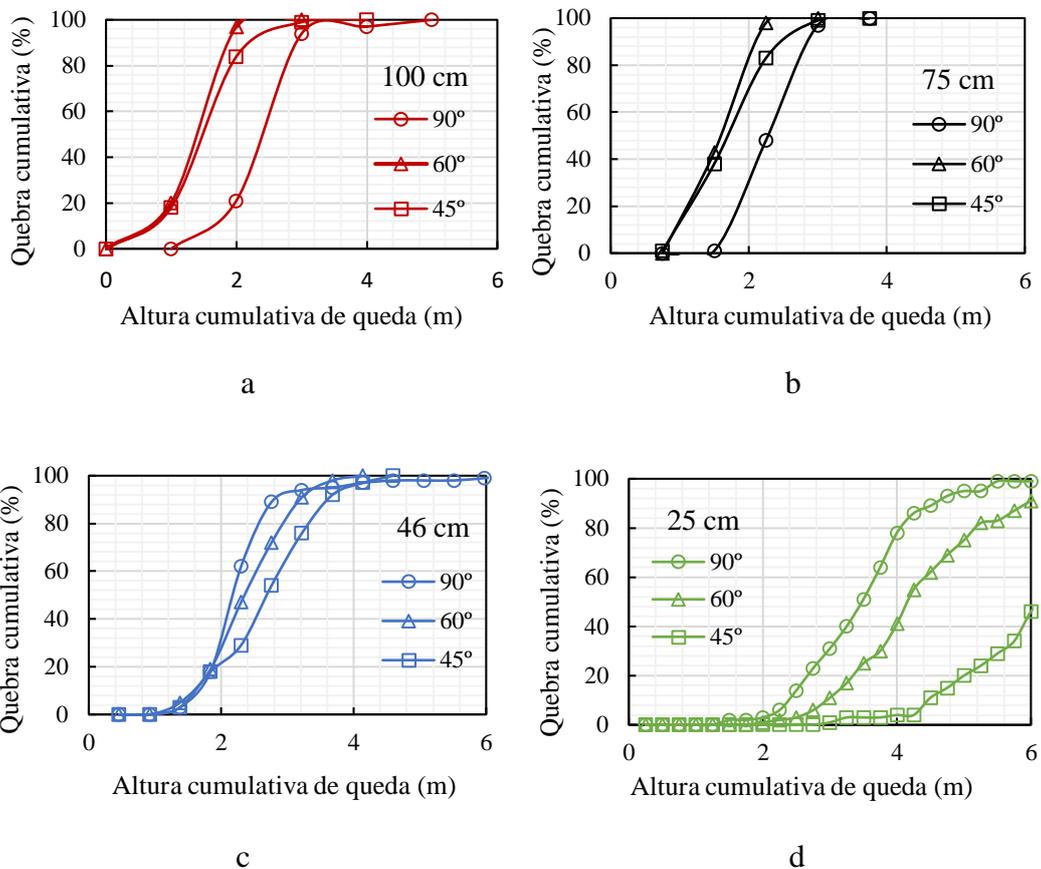


Figura 5.35 Quebra cumulativa em relação à altura cumulativa de queda para diferentes angulações nas quatro alturas de queda a) 100 cm b) 75 cm c) 46 cm d) 25 cm

6 CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou a importância de compreender a ação das variáveis de processo para o entendimento da degradação mecânica das pelotas verdes. Um dos principais desafios foi a reprodução de pelotas em escala laboratorial com o mesmo padrão de resistência comparadas às da indústria. Ao estudar o efeito da variação da quantidade de bentonita, comprovou-se que as pelotas verdes se tornam mais resistentes à medida que a dosagem de bentonita aumenta. Evidentemente, essa adição é limitada pelo fato que ela introduz contaminantes indesejáveis e se torna contraproducente a etapa de endurecimento, além de aumentar o custo de produção.

Quanto ao efeito do tamanho das pelotas, mostrou-se presente somente quando se impactava pelotas em alturas menores, como no caso dos ensaios de queda na altura de 25 cm. Nas alturas maiores as três faixas de tamanho possuem praticamente o mesmo comportamento de quebra, tornando evidente o quão severa é a degradação quando as pelotas sofrem impactos a partir de 1 metro dentro da usina. Ainda assim, observou-se um aumento da resistência e energia de fratura de pelotas de menores dimensões.

Em relação à alteração da superfície de impacto, confirma-se que as quedas no aço são mais danosas que aquelas na borracha. Do mesmo modo, foi observado maior severidade quando as pelotas sofrem quedas a altura também maiores, não importando o tipo de superfície. O efeito da superfície de queda somente se mostrou visível quando as pelotas são submetidas a impactos de alturas menores. Foram também testados diferentes ângulos de impacto dos grânulos. Os resultados mostraram que para alturas menores quanto maior a componente tangencial da superfície, maior o número de impactos necessários para fraturar e/ou trincar as pelotas. Por outro lado, nas alturas maiores a influência da componente tangencial no comportamento dos grânulos foi o oposto. A degradação mecânica das pelotas verdes depende do tipo de esforço a elas submetido por terem essa característica altamente plástica. À medida que aumenta a velocidade de carregamento, a energia mediana de trincamento aumenta.

Foi observada uma drástica redução na resistência mecânica das pelotas após o processo térmico causada pelo dano residual enquanto verdes, o que indica que mesmo impactos que são incapazes de fragmentar pelotas, podem acarretar em perda de qualidade no caso da pelota queimada.

Vale ressaltar que atualmente não se encontra estudos detalhados sobre a degradação das pelotas verdes. Este fato evidencia a importância do presente trabalho para caracterização, controle da produção e modelagem matemática da degradação mecânica das pelotas verdes, fornecendo subsídios para o desenvolvimento futuro de um modelo matemático para o fenômeno.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a grande importância do tema abordado no trabalho e o seu caráter inédito, diversos estudos adicionais podem ser sugeridos. Por exemplo, pode-se explorar a ação dos efeitos estudados por meio de filmagens com câmera de alta velocidade, desde a visualização do fenômeno de formação das pelotas no equipamento pelotizador até o momento de ativação do dano quando as pelotas são submetidas a esforços. Além de relacionar a porosidade com a umidade residual e a formação de trincas e quebra.

Outro tema a ser mais explorado seria a influência da inclinação da superfície e angulações, mensurar a degradação quando as pelotas se chocam contra quinas, como no caso dos defletores utilizados na usina para melhor espalhamento das pelotas sob as peneiras de rolos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUZEID, A.Z.M., SEDDIK, A.A. **Effect of Iron Ore Properties on its Balling Behaviour**. Department of Mining. Faculty of Engineering. Cairo University. Giza, v.29, p.233-241, 1980.

ABOUZEID, A.Z.M., SEDDIK, A.A., EL-SINBAWY. **Pelletization Kinetics of an Earthy Iron Ore and the Physical Properties of the Pellets Produced**. Department of Mining, Faculty of Engineering, Cairo University, v.24, p.229-236, 1979.

ANDERSON, R.N., 2012, Materials Science. **Wiley Online Library**.

ANTONYUK, S., TOMAS, J., HEINRICH, S., MÖRL, L. **Breakage behaviour of spherical granulates by compression**. Chemical Engineering Science, v.60, p.4031-4044, 2005.

AUGUSTO, K.S. **Identificação automática do grau de maturação de pelotas de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos, PUC Rio, 2012.

CAMPOS, A.R., FONSECA, V.O. **Aglomerção: Pelotização**. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2010.

CARVALHO, E.A., BRINCK, V. **Aglomerção: Briquetagem**. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2010.

CASEY, L. **Organic binders for iron ore pelletization**. School of Chemical Technology. Degree Programme of Chemical Technology. Aalto University, 2016.

CAVALCANTI, P.P., TAVARES, L.M. Statistical analysis of fracture characteristics of industrial iron ore pellets. **Powder Technology**, v.325, p.659–668, 2018.

COSTA, C.M. **Caracterização de fluidos complexos**. Departamento de Engenharia Mecânica. PUC Rio, 2016.

CUNHA, E.R. **Modelagem mecanicista de britadores de impacto de eixo vertical**. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

DEPEC, 2017. **Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos**. Disponível em: <
https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_minerio_de_ferro.pdf
>. Acesso em: 13 de set. de 2019.

DOWLING, N.E. **Mechanical behavior of materials**. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Fourth Edition, 2012.

EISELE, T.C., KAWATRA, S.K. A Review of binders in iron ore pelletization. **Mineral Processing & Extractive Metall.** Rev., v.24: p.1-90, 2003.

EISELE, T.C., KAWATRA, S.K. A Review of binders in iron ore pelletization. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal**. Department of Chemical Engineering, Michigan, Technological University, 2010.

FONSECA, M.C. **Influência da distribuição granulométrica do *pellet feed* no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta**. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

FONSECA, V.O. **Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2003.

FORSMO, S. **Influence of Green Pellets Properties on Pelletizing of Magnetite Iron Ore**. Doctoral Thesis. Department of Chemical Engineering and Geosciences. Luleå University of Technology, 2007.

FORSMO, S.P.E., APELQVIST, A.J., BJÖRKMAN, B.M.T., SAMSKOG, P.O. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder. **Powder Technology**, v.169, p.147-158, 2006.

GUL, A., SIRKECI, A.A., BOYLU, F., GULDAN, G., BURAT, F. Improvement of mechanical strength of iron ore pellets using raw and activated bentonites as binders. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v.51(1), p.23-36, 2014.

HALT, J.A., KAWATRA, S.K. **Review of Organic Binders for Iron Ore Agglomeration**. Michigan Technological University, 2013.

HENRIQUES, A.B., ANGRISANO, L.C.S., OLIVEIRA, I.M. **Caracterização mineralógica de hematitas do Quadrilátero Ferrífero**. Faculdade Kennedy, 2012.

HENRIQUES, A.B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

ISO 4700, 2007. **Iron ore pellets for blast furnace and direct reduction feedstocks — Determination of the crushing strength**.

IVESON, S.M., LITSTER, J.D. Growth regime map for liquid-bound granules. **Particle Technology and Fluidization**, v.44, n.7, 1998.

IVESON, S.M., LITSTER, J.D., HAPGOOD, K., ENNIS, B.J. Nucleation, growth, and breakage phenomena in agitated wet granulation process: a review. **Powder Technology**, v.117, p.3-39, 2001.

IVESON, S.M., PAGE, N.W. Dynamic strength of liquid-bound granular materials: The effect of particle size and shape. **Powder Technology**, v.152, p.79-89, 2005.

KHANAL, M., SCHUBERT, W., TOMAS, J. Compression and impact loading experiments of high strength spherical composites. **International Journey of Mineral Processing**, v.86, p.104-113, 2007.

LOPES, M. O minério de ferro no Brasil: História, maiores empresas e mercado. **Técnico e Mineração**. 2016. Disponível em: <<https://tecnicoemineracao.com.br/minerio-de-ferro-no-brasil/>>. Acesso em 28 de set. 2017.

MÜLLER, P., ANTONYUK, S., TOMAS, J. Influence of Moisture Content on the Compression Behavior of Granules. **Chemical Engineering & Technology**, v.126, p.204-2015, 2011.

NEWITT, D.M., CONWAY-JONES, J.M. **A contribution to the theory and practice of granulation**. Trans.Instn.Chem.Engrs. v.36, p.422-442, 1958.

MARTINS, M. **Análise de degradação intempérica de pelotas de minério de ferro**. Projeto de graduação do curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

MEYER, K. **Pelletizing of Iron Ores**. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, e Verlag Stahleisen mbH, Dusseldorf, 1980.

PANDEY, P., LOBO, N.F., KAMUR, P. Optimization of Disc Parameters Producing More Suitable Size Range of Green Pellets. **International Journal of Metallurgical Engineering**, v.1(4), p.48-59, 2012.

PAVANI, R.C., CASAGRANDE, C., JÚLIO S.S. **Influência do minério do complexo minas centrais nos processos de moagem e pelotamento**. Faculdade do Centro Leste. Serra, ES, 2018.

PENA, E. Q. **Operações de Pelotização**, In: Curso de Especialização em Sistemas Mínero-Metalúrgicos, Valer/Vale/Fundação Gorceix, Ouro Preto, Minas Gerais, 2011.

PINHEIRO, J.C.F. **A mineração brasileira de ferro e a reestruturação do setor siderúrgico**. Tese (Doutorado) – Área de Administração e Política de Recursos Minerais, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

PROENÇA, S.P.B. **Elementos de mecânica do dano em meios contínuos**. São Carlos, 2001 Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/resist/SIAE2.0/aulas/apostilas/Aula3.pdf>>. Acesso em 20 de jan. 2018.

QUARESMA, L.F. **Balanco Mineral Brasileiro**. Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM, 2001.

QUARESMA, L.F. Projeto de assistência técnica ao setor de energia. **Ministério de Minas e Energia – MME**, 2009.

RAMAKER, J. **Fundamentals of the high-shear pelletization process Groningen**. University of Groningen, 2001.

REYNOLDS, G.K., FU, J.S., CHEONG, Y.S., HOUNSLOW, M.J., SALMAN, A.D. Breakage in granulation: A review. **Chemical Engineering Science**, v.60, p.3969-3992, 2005.

RODRIGUES, G.F. **Estudo da redução de pelotas de minério de ferro por hidrogênio e mistura de hidrogênio com monóxido de carbono**. Tese (Doutorado). Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

RODRIGUES, G.F., TELLES, V.B., TENÓRIO, J.A.S., ESPINOSA, D.C.R. Avaliação das características da superfície específica de *pellet feed* por adsorção de nitrogênio. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Cuiabá - MT, 2014.

SAHOO, R. Degradation characteristics of steel making materials during handling. **Powder Technology**, v. 176, p.77–87, 2007.

SALMAN, A.D., REYNOLDS, G.K., FU, J.S., CHEONG, Y.S., BIGGS, C.A., ADAMS, M.J., GORHAM, D.A., LUKENICS, J., HOUNSLOW, M.J. Descriptive classification of the impact failure modes of spherical particles. **Powder Technology**, v.143-144, p.19-30, 2004.

SALMAN, A.D., REYNOLDS, G.K., TAN, H.S., GABBOTT, I., HOUNSLOW, M.J. **Breakage in granulation**. Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield, UK, 2007.

SALMAN. **Breakage Probability of Repeated Stressing of Granules by Configuring the Stressing Points**. Faculdade de Engenharia de Processos e Sistemas. Universidade Magdeburg, 2014.

SALMAN, A.D., RUSSEL, A., AMAN, S., TOMAS, J. Breakage probability of granules during repeated loading. **Powder Technology**, v.269, p.541-547, 2015.

SASTRY, K.V.S., FUERSTENAU, D.W. Mechanisms of agglomerate growth in green pelletization. **Powder Technology**, v.7, p.97-105, 1973.

SASTRY, K.V.S. **Pelletization of fine coals**. Final Report. University California. Berkeley, 1995.

SCHNEIDER, C.L., NEUMANN, R. Considerações sobre a geração de superfície específica em minérios de ferro porosos. **XIX ENTMME**, Recife – PE, 2002.

SILVA, B.B. **Modeling and optimization of green pellets classification on roller screens using the discrete element method**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

SILVA, L. **Influência da umidade no processo de pelotização**. Curso técnico em metalurgia. Faculdade do Centro Leste – UCL, 2008.

SILVEIRA, M.A.C. **Modelagem da degradação de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

SIVRIKAYA, O., AROL, A.I. **Use of organic binders and borates in hematite pelletization**. Research Gate. Middle East Technical University, Department of Mining Engineering, 2009.

SRIVASTAVA, U., KAWATRA, S.K., EISELE, T. Study of organic and inorganic binders on strength of iron oxide pellets. **The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International**, 2013.

SUSHMA, R., BATTU, S., RAO, Y.U.M. A review on pellets and pelletization techniques. **Pharma Biotika**, 2014.

TAVARES, L.M., KING, R.P. Single-particle fracture under impact loading. **International Journal of Mineral Processing**, v.54, p.1-28, 1998.

TAVARES, L.M. Energy absorbed in breakage of single particles in drop weight testing. **Minerals Engineering**, v.12, p.43-50, 1999.

TAVARES, L.M., KING, R.P. Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics. **Powder Technology**, v.123, p.138-146, 2002.

TAVARES, L.M. Optimum routes for particle breakage by impact. **Powder Technology**, v.142, p.81-91, 2004.

TAVARES, L.M. Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation. **Powder Technology**, v.190, p.327-339, 2009.

TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M. Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics. **International Journal of Mineral Processing**, v.112-113, p.1-6, 2012.

TEO, C.S., WATERS, A.G., NICOL, S.K. Quantification of the breakage of lump materials during handling operations. **International Journal of Mineral Processing**, v.30, p.159-184, 1990.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY; **Mineral commodity summaries 2019**. U.S. Geological Survey, p.89, 2019.

WASILKOSKI, C.M. **Caracterização do polietileno de baixa densidade através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com a análise por impedância dielétrica.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2002.

WEEDON, D.M., WILSON, F. Modelling iron ore degradation using a twin pendulum breakage device. **International Journal of Mineral Processing**, v.59, n.3, p.195–213, 2000.

YAMAGUCHI, S., FUJII, T., YAMAMOTO, N., NOMURA, T. KOBELCO Pelletizing Process. **KOBELCO Technology Review**, n.29, 2010.