

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA A COMPRESSÃO EM COQUE E A SUA CORRELAÇÃO COM O TESTE DE TAMBOREAMENTO*

*Iara Patricia Vieira de Oliveira¹
Guilherme Liziero Ruggio da Silva²
Paulo Santos Assis³
Lorena Cristina Amorim Moura⁴
Leandro Rocha Lemos⁵*

Resumo

O coque fica exposto a diferentes solicitações mecânicas do tipo impacto, abrasão e compressão, desde o desenformamento até o seu consumo no Alto-Forno. Para evitar que o coque sofra uma acentuada degradação, é exigido que o mesmo apresente uma elevada resistência mecânica a frio. Para monitorar tal parâmetro, utiliza-se principalmente o teste de tambor, porém este contempla apenas a degradação por impacto e abrasão. Neste contexto, este trabalho desenvolveu uma metodologia para avaliar a resistência mecânica à compressão, inicialmente em partículas individuais de coque, apontando quais seriam as granulometrias mais resistentes. Os coques foram transformados em corpos de provas e testados em máquina de ensaio universal. Os resultados apontam que a tensão média de ruptura cresce com o aumento da granulometria. Posteriormente, foi avaliado a resistência mecânica à compressão em leito de coque, onde foi possível simular em uma prensa hidráulica, a pressão que a coluna das cargas exerce sobre o leito de coque no Alto-Forno e, posteriormente, correlacionou a compressão com o teste de tambor e se obteve excelentes resultados.

Palavras-chave: Coque; Compressão; Resistência mecânica.

EVALUATION OF MECHANICAL RESISTANCE TO COKE COMPRESSION AND ITS CORRELATION WITH INDEX DRUM

Abstract

The coke is exposed to different mechanical demands of the type impact, abrasion and compression, from the dewatering to its consumption in the blast furnace. To prevent coke from undergoing severe degradation it is required that it has a high mechanical strength. In order to monitor this parameter, the drum test is used mainly, but only the degradation by impact and abrasion. In this context, this work developed a methodology to evaluate the mechanical resistance to compression, initially in individual coke particles, pointing out the most resistant granulometry. The cokes were transformed into test bodies and tested on a universal testing machine. The results indicate that the average tensile stress increases with increasing particle size. Later, the mechanical resistance to compression in coke bed was evaluated, it was possible to simulate in a hydraulic press the pressure that the column of the loads exerts on the coke bed in the Blast Furnace and later correlated the compression with index drum and obtained excellent results.

Keywords: Coke; Compression; Mechanical Resistance

^{1,4} Mestranda em Engenharia de Materiais, REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, MG,

² Doutor Engenharia dos Materiais REDEMAT/UFOP, Gerdau Ouro Branco, Brasil.

³ Prof. Dr. Titular da Escola de Minas da UFOP

⁵ Prof. Dr. Adjunto do DEMET – Escola de Engenharia da UFMG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O coque metalúrgico, produzido a partir de misturas de carvões coqueificáveis, desempenha três principais funções no Alto-Forno, sendo elas mostradas na Figura 1. Os papéis térmico e químico podem ser substituídos, em partes, por outros combustíveis, já o papel físico, somente o coque desempenha-o com efetividade.

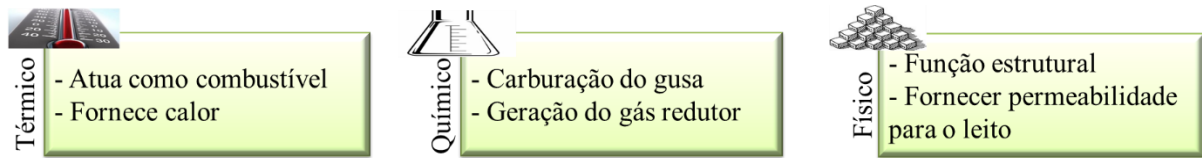


Figura 1. Principais funções que o coque desempenha no Alto-Forno

Atualmente, para as empresas siderúrgicas se manterem no cenário competitivo, as mesmas buscam, cada vez mais, a substituição parcial do coque por materiais alternativos, como a técnica de injeção de carvão pulverizado (PCI) nas ventaneiras do alto-forno, em taxas cada vez mais elevadas. E, com isso ocasiona uma diminuição da espessura da camada de coque. Atrelado a isto, ao longo das últimas décadas, os Altos-Fornos sofreram mudanças significativas nas suas dimensões, passando por um aumento considerável do seu volume, como um dos princípios para aumentar a capacidade produtiva, conforme mostrado na Figura 2.

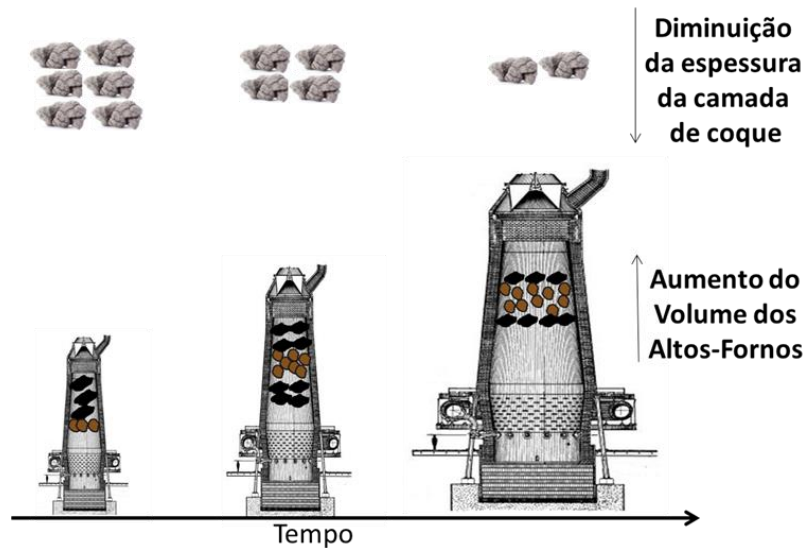


Figura 2. Mudanças que os Altos-Fornos sofreram ao longo dos anos.

Um aumento nas taxas de injeção de PCI proporciona uma diminuição no consumo de coque rate, porém é esperado que o coque que esteja sendo consumido, passe por um tempo maior de residência dentro do reator, sob condições extremas de degradação, logo exigindo uma maior resistência mecânica do mesmo.

Dentro do reator, na zona granular, o coque está exposto a diferentes tipos de esforços que atuam promovendo a sua quebra através do impacto, da abrasão e da compressão, e cada fenômeno promove uma respectiva redução no seu tamanho.

Os somatórios destes fatores implicam na exigência de uma elevada resistência mecânica do coque, para que o mesmo garanta uma marcha estável no reator.

O setor siderúrgico avalia a resistência mecânica à frio no coque, principalmente através do ensaio de tamboreamento DI₁₅₀₋₁₅ (Drum Index), o qual simula a degradação por impacto e abrasão do coque ao longo da rota Coqueria até o Alto-Forno, conforme mostra a Figura 3. Porém este não é o único tipo de degradação ao qual o coque está exposto, durante seu ensilamento e principalmente dentro do reator, o coque sofre esforços compressivos e os ensaios de tambor não contemplam tais solicitações.

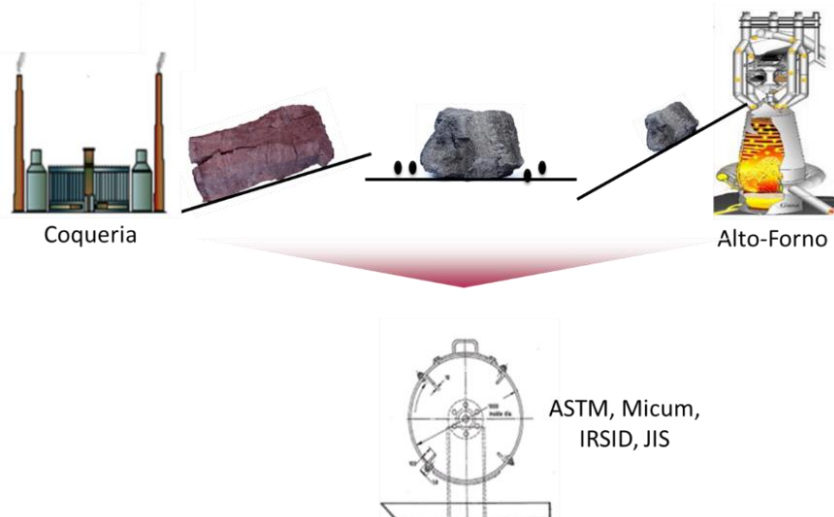


Figura 3: Simulação da degradação do coque ao longo da rota Coqueria Alto-Forno

Os ensaios de resistência em tambor submetem o coque a um conjunto de esforços conforme mostrado na Figura 4. Num primeiro estágio, o coque é submetido à fragmentação por impacto, em que a quebra ocorre principalmente ao longo dos planos das fissuras do material. Num segundo momento, ocorre abrasão entre as partículas formadas no estágio anterior (PATRICK et al., 1989 apud FLORES, 2014).

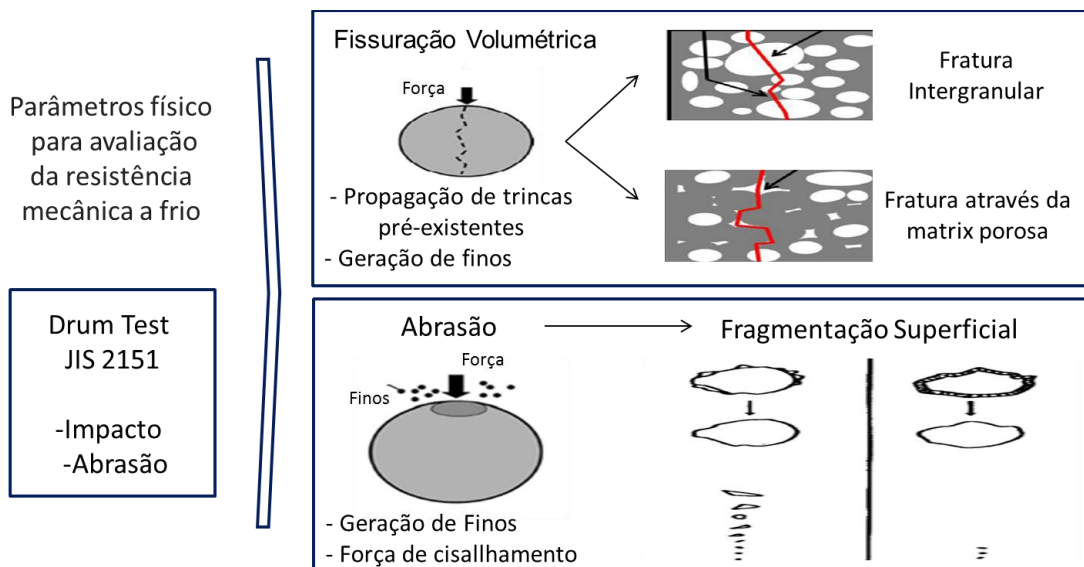


Figura 4. Princípios de fragmentação das partículas de coque.

O estudo de materiais particulados, como o coque, necessita de uma abordagem diferente das que normalmente são usadas na mecânica da fratura e na resistência dos materiais, uma vez que estas partículas não possuem formatos regulares. Por serem heterogêneas e anisotrópicas, apresentam defeitos como poros e trincas, o que dificulta o conhecimento das distribuições internas dos esforços.

Durante o impacto do carregamento das partículas de coque dentro do reator, estas partículas são submetidas, em seus polos de contato, a intensos esforços de compressão e de cisalhamento, conforme mostrado na Figura 5.

Estes, são gerados internamente na partícula e provocam a fragmentação e as deformações inelásticas. Mais precisamente, em uma região de alta densidade, de energia de deformação da partícula na qual, abaixo desta, começam a surgir esforços de tração, que se estendem até o polo oposto de aplicação da carga. É nesse ponto, ou em uma trinca já existente, que se inicia uma ou mais fraturas da partícula (KING, 2001 apud PIRES, 2016).

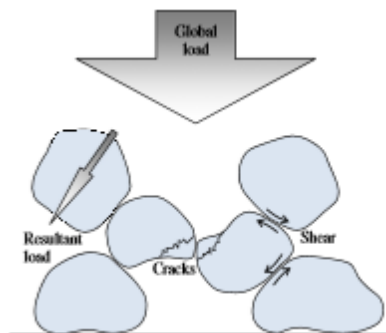


Figura 5. Interação esquemática de partículas submetidas a um carregamento.

(THIBODEAU et al, 2014)

O ensaio de compressão visa avaliar a fragmentação do material a partir da sua fratura, porém não existe uma norma específica para aplicação no coque, mesmo assim, alguns autores como TSAFNAT e AMANAT (2008) ,KIM e SASAKI (2010) realizaram pesquisas sobre.

Para TSAFNAT et al (2008) há uma compreensão limitada sobre o comportamento do coque sobre compressão.

KIM e SASAKI (2010) realizou um estudo e a partir de análise computacional, e avaliou o efeito da fratura no coque em camadas, de acordo com a Figura 6.

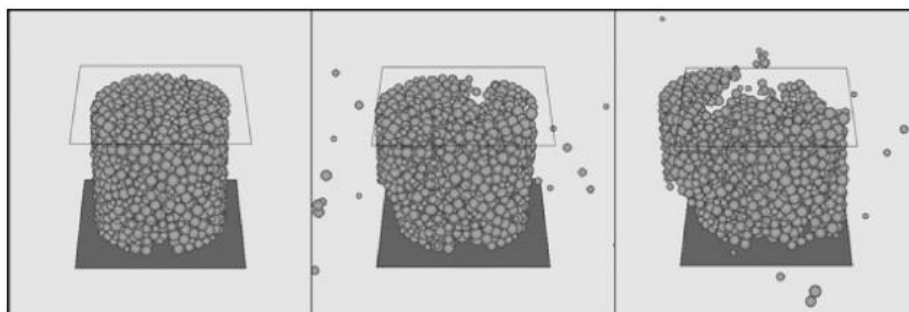


Figura 6. Simulação instantânea do fenômeno de ruptura por compressão em amostra de coque

(KIM; SASAKI, 2010)

Estes autores definem que o mecanismo de degradação por compressão no coque poroso é semelhante ao de um material “esponjoso frágil”, no sentido de uma região distinta de elasticidade linear, seguida de fratura frágil.

Outro fator a ser observado na Figura 6, é que ao se analisar a estrutura interna do coque durante a compressão, observa-se que uma pequena parte da compressão ocorre apenas no topo da amostra, com as áreas diretamente abaixo deste ponto de compressão permanecendo com sua estrutura intacta.

AMANAT (2009) estudou a reconstrução volumétrica de uma amostra de coque obtida a partir de dados de imagem de microtomografia, elucidando a estrutura interna da amostra de coque antes, durante e após a compressão, conforme mostrado na Figura 7.

Este autor observou que, durante os testes de compressão, as amostras falham de forma progressiva, sem danos visuais evidentes no seu exterior, e sugere que a explicação das amostras manterem, relativamente, a sua forma, mesmo após à compressão, sem queda de partículas menores, é devido ao fato de que a amostra colapsa em si mesma. Ou seja, os finos que são gerados na parte superior, oriundas do atrito entre embolo e amostra, se acomodam e passam a ocupar os espaços vazios presentes na estrutura interna da amostra, promovendo uma densificação no material.

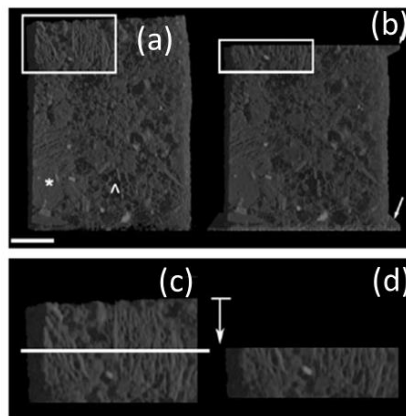


Figura 7. Reconstrução volumétrica de uma amostra de coque obtida a partir de dados de imagem de micro-tomografia (a) antes, (b) e (c) durante, e (d) após o ensaio de compressão (AMANAT, 2008)

AMANAT et al. (2008) considera, também, que o coque é semelhante, em estrutura e forma, a muitos tipos de materiais “esponjosos frágeis” (como a cerâmica e o vidro). Para estas “esponjas elásticas – frágeis”, os mecanismos de deformação são claramente estabelecidos. Em baixas tensões, elas demonstram elasticidade linear, seguidas de um longo patamar de colapso de fratura frágil e, em seguida, um aumento acentuado do estresse, à medida que o material sofre densificação. Esse comportamento é semelhante à resposta tensão-deformação das amostras de coque.

A Figura 8 mostra a curva tensão-deformação para o teste de compressão realizado em duas amostras de coque sob duas taxas de deslocamento diferentes. Segundo AMANAT et al. (2008) as duas amostras se comportam de forma semelhante, independente das diferentes taxas de deslocamento aplicadas, e estas apresentam duas regiões distintas nas curvas tensão-deformação: na primeira região, a amostra absorve energia, e esta não é suficiente para promover a fratura no coque, isto é, é a região inicial de carga sem falha (elasticidade linear). Na outra região, o coque é capaz de suportar a carga, mas começa a ocorrer falhas repetitivas à medida que os

caminhos de resistência alternativos são estabelecidos. e então, à medida que a amostra começa a colapsar progressivamente, o coque entra em uma zona de tensão subsequente a fratura, até que o material não suporte mais a carga e frature.

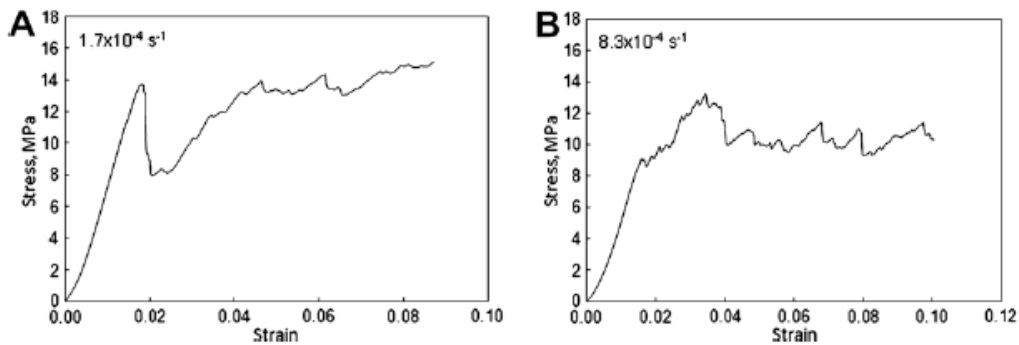


Figura 8. Curvas de tensão-deformação representativas para testes de compressão em amostras de coque A e B (AMANAT et al, 2008).

O presente trabalho desenvolveu uma metodologia para avaliar a resistência mecânica à compressão, inicialmente em partículas individuais de coque, nas diferentes faixas granulométricas, que alimentam o Alto-Forno, pois uma variabilidade na distribuição de tamanhos implica em variações no comportamento mecânico do coque.

O foco na primeira etapa é determinar quais as partículas mais indicadas para alimentar o reator, sendo que neste passo o coque é transformado em corpo de prova e aplicado uma pressão contínua até que o material se rompa.

Na etapa posterior, o objetivo foi replicar as condições mais próximas da real, ou seja, os esforços compressivos foram aplicados sobre as camadas de coque numa faixa granulométrica dispersa. Sendo assim, nesta fase foi avaliado a resistência mecânica à compressão em leito de coque, onde foi possível simular em uma prensa hidráulica, a pressão que a coluna das cargas exerce sobre o leito de coque no Alto-Forno e, posteriormente, correlacionar a compressão com o teste de tambor, conforme mostra a Figura 9. Nesta etapa o coque foi testado in-natura sob uma pressão fixa e pré-determinada a partir de cálculos.

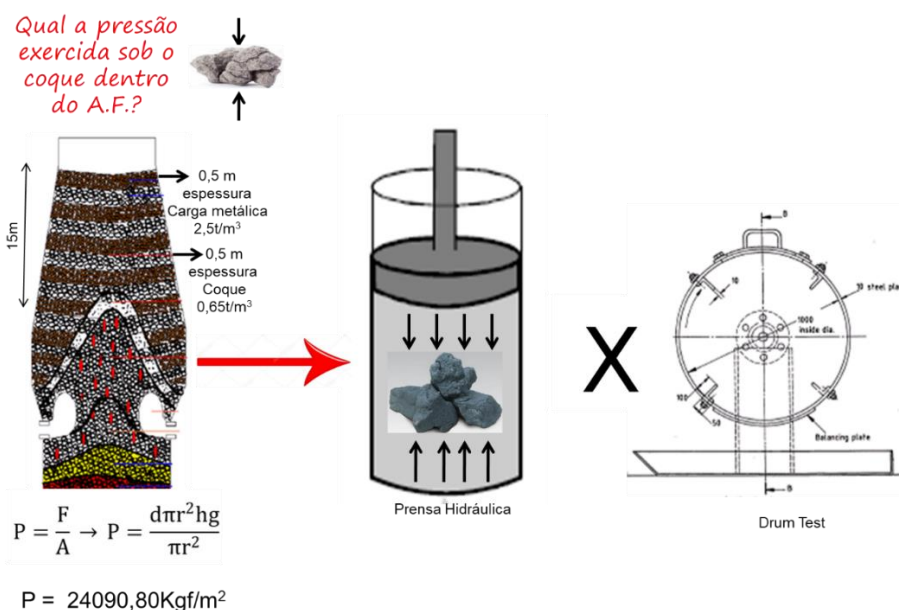


Figura 9: Compressão em leito de coque e sua correlação com o DI.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os coques utilizados, para a consolidação deste trabalho, foram cedidos pela Usina Siderúrgica Gerdau-Ouro Branco, e os experimentos necessários foram realizados nos Laboratórios de Laminação de Aços Planos e de Matérias Primas.

2.1. Amostragem, classificação e preparação do corpo de prova para teste de compressão nas partículas individuais de coque.

Inicialmente foi realizada a amostragem do coque segundo a norma ASTM D346 (Standard Practice for Collection and Preparation of Coke Sample for Laboratory Analysis), seguida de classificação granulométrica nas seguintes peneiras (13,0, 19,0, 25,0, 37,5, 50,0, 63,0, 75,0 e 100,0mm), porém foram utilizadas apenas as granulometrias típicas do coque metalúrgico (25,0; 37,5; 50,0; 63,0; 75,0)mm.

Para a transformação do coque em corpo de prova, as amostras selecionadas aleatoriamente, formaram dez unidades por faixa granulométrica, e foram serradas com velocidade lenta em uma máquina de serra industrial para aço, e posteriormente lixadas em uma máquina Politriz de tal forma a obter corpos de provam com faces paralelas lisas e dimensões muito próximas (densidade, área e volume e a massa). A Figura 10 mostra as etapas de preparação dos corpos de prova.

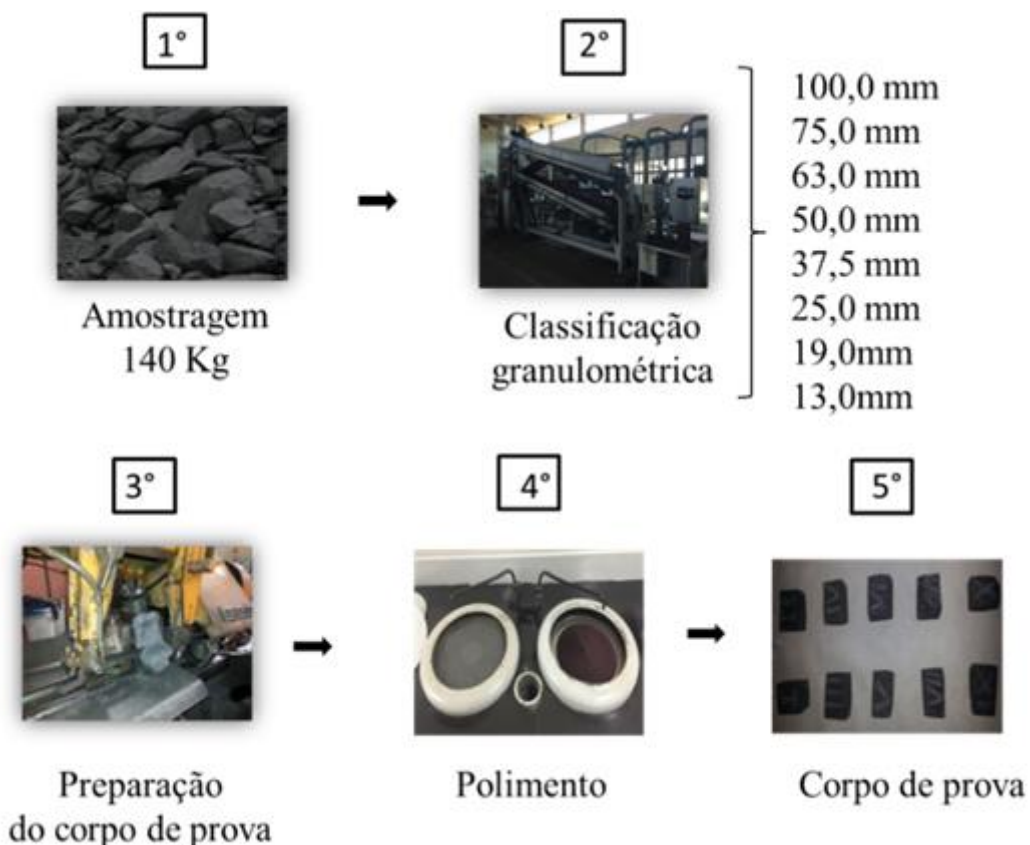


Figura 10: Etapas de preparação do corpo de prova.

2.2. Teste de compressão nas partículas individuais de coque.

Os corpos de prova foram submetidos à compressão em uma máquina de ensaio universal da marca Shimadzu, com uma célula de carga de 300kN. A velocidade de deslocamento foi de 2mm/min até que o coque sofresse ruptura. Com isso, foram obtidos curvas tensão versus deformação, conforme mostrado na Figura 11.

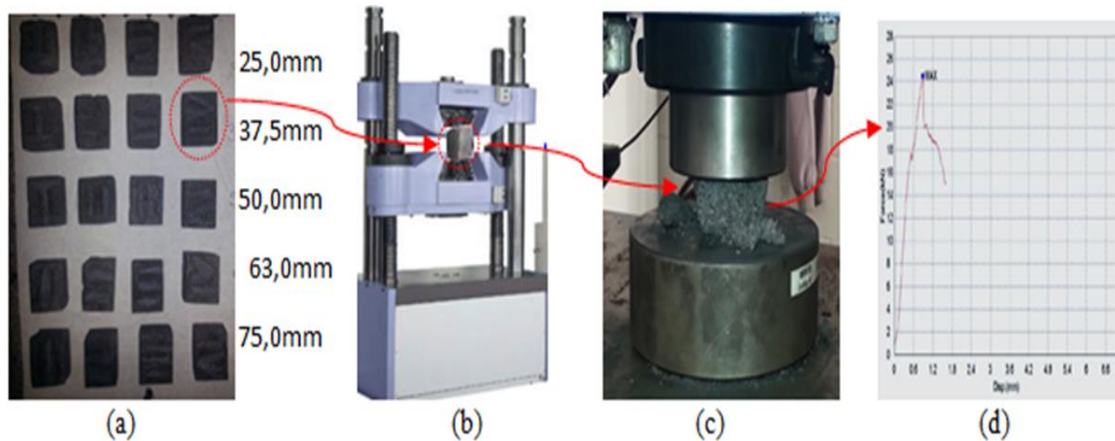


Figura 11: (a) corpo de prova; (b) máquina de ensaio universal; (c) teste de compressão; (d) gráfico tensão de ruptura

2.3. Teste de compressão em leito de coque e sua correlação com DI.

Como o teste de compressão busca uma correlação com o DI_{15-150} , foi utilizada a norma JIS K2151, como referência.

Inicialmente foi realizada a amostragem do coque segundo a norma ASTM D346, seguida de classificação granulométrica nas seguintes peneiras (13.0, 19.0, 25.0, 37.5, 50.0, 63.0, 75.0 e 100.0mm), porém para o ensaio foi utilizado apenas as granulometrias típicas do coque metalúrgico para compor uma amostra de 2kg.

Após secadas, as peças de coque são acomodadas em uma prensa hidráulica e pressionadas sob uma pressão de 35000psi e mantida por um minuto. Em seguida, a amostra é peneirada nas malhas de 50, 25 e 15mm, e posteriormente efetuado o cálculo para determinação do % retido em cada peneiras, de acordo com a fórmula requerida na norma JIS K2151.

Os testes de compressão foram realizados em duplicata e triplicata. A Figura 12 mostra a sequência para realização deste ensaio. As amostras foram coletadas em diferentes pontos do circuito Coqueria até o Alto-Forno, para que desta forma obtivesse diferentes níveis de estabilização do coque e consequentemente diferentes valores de DI.

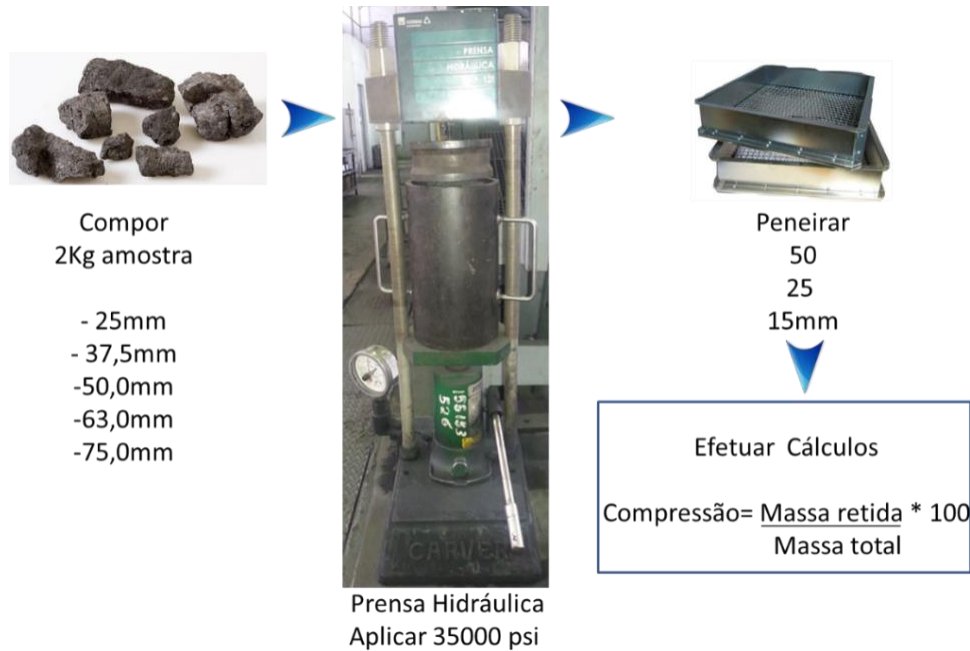


Figura 12: Teste de compressão em leito de coque

3 RESULTADOS E DISCUÇÕES

3.1. Compressão em partículas individuais de coque

Nesta etapa, o foco foi determinar quais partículas seriam as mais indicadas para alimentar o reator, mas um ponto que foi observado é o fato da variação da tensão de ruptura dentro de uma mesma faixa granulométrica.

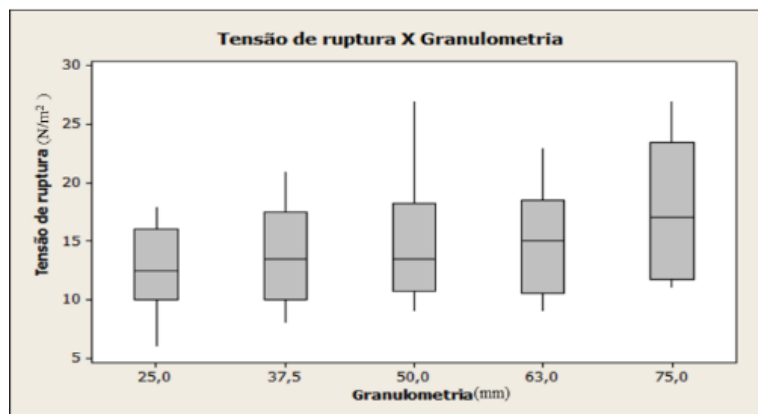


Figura 13. Correlação da tensão de ruptura com densidade aparente próximas.

Segundo Tavares (1997), existe uma variabilidade intrínseca relacionada à fratura em populações de partículas, ou seja, em partículas do mesmo material, com mesma faixa granulométrica, e é possível encontrar uma grande variabilidade de partículas com diferentes resistências, sendo algumas mais fáceis de fratura que outras. Esta é uma das maiores dificuldades encontradas para caracterizar a energia necessária para fraturar uma partícula de coque.

Este autor esperava que quanto menor a granulometria de materiais frágeis, maior a energia específica de fratura, ou seja, as partículas com maior granulometria teriam maior proporção de quebra devida a uma maior presença de trincas, enquanto que as

de menor granulometria seriam as mais resistentes, pois as mesmas já se encontram estabilizadas. Contudo, observou-se o contrário, o coque de maior granulometria (75mm) apresentou as maiores tensões média de ruptura, enquanto que os coques de menor granulometria (25mm) apresentaram menores tensões média de ruptura.

Os resultados apontam que a tensão média de ruptura cresce com o aumento da granulometria, conforme ilustra a Figura 14.

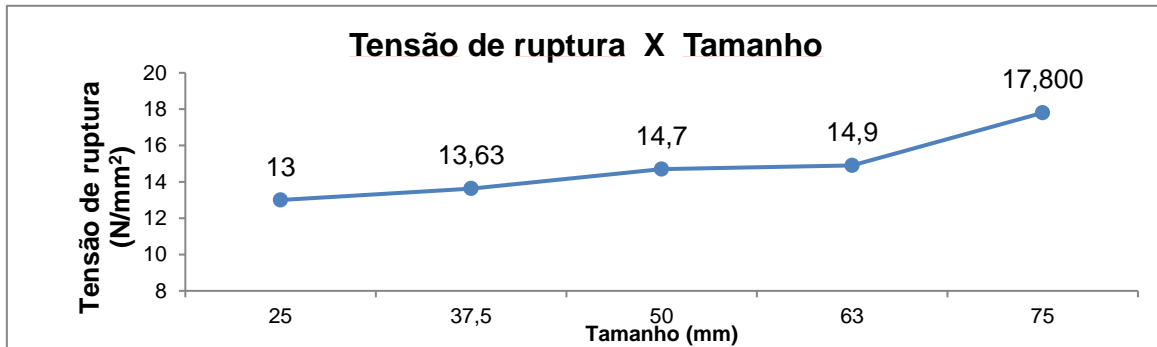


Figura 14. Correlação da tensão média de ruptura com a granulometria.

A partir da análise dos resultados dos gráficos pode-se concluir que é complicado prever onde a ruptura do coque irá ocorrer, isto é, devido à distribuição não uniforme dos poros, trincas, à microtextura do coque, a presença de minerais e inertes na matriz. Logo, não é fácil encontrar uma regularidade nos resultados, mesmo analisando dentro de uma mesma faixa granulométrica.

A Figura 15 mostra as curvas Tensão x Deformação, ilustrando o que ocorre na região elástica. É possível observar no gráficos (a) a fase elástica apresenta um crescimento linear até atingir o pico máximo de força absorvida pelo material, em seguida ocorre a queda súbita, indicando que o material foi fraturado, e em (b) o aumento da resistência não é tão linear. Isto pode ser explicado, pois durante a compressão ocorre a geração de partículas finas que vão se acomodando nos espaços vazios, promovendo uma densificação no material e como consequência, um aumento da resistência do mesmo, fazendo com que o material absorva mais energia.

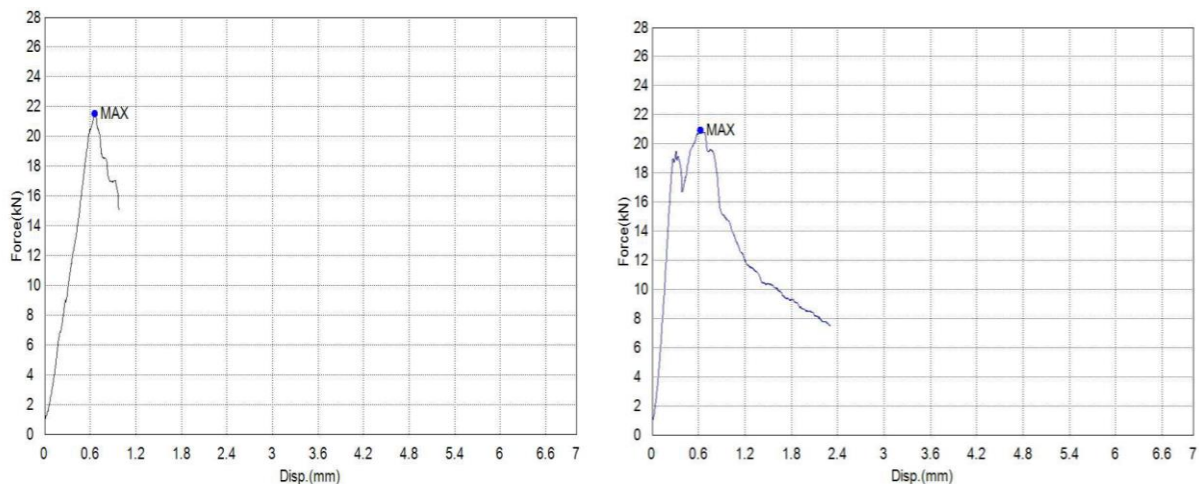


Figura 15. Gráfico tensão x deformação do ensaio de compressão.(a) crescimento linear da resistência, (b) crescimento não linear.

3.2. Correlação do ensaio de compressão em leito versus o DI₁₅₋₁₅₀

O teste de compressão em leito de coque mostra uma certa dispersão nos resultados, devido ao fato da prensa hidráulica ser manual e não automática.

Foi obtida correlação adequada entre o ensaio de compressão em leito e o teste de DI, mesmo para diferentes valores de resistência mecânica a frio, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Correlação entre os testes de Compressão X DI

	Amostra -1 DI	Amostra-2 DI	Amostra-3 DI	Amostra-4 DI	Amostra-4 DI
	84,90	83,00	87,10	87,60	88,90
	84,94	83,50	86,77	89,74	88,39
	84,00	82,41	88,32	84,70	87,58
Compressão		82,50	86,77	87,19	
Média	84,47	82,80	87,29	87,21	87,99

A partir dos resultados encontrados no teste de compressão foi determinado uma regressão linear (Figura 16).

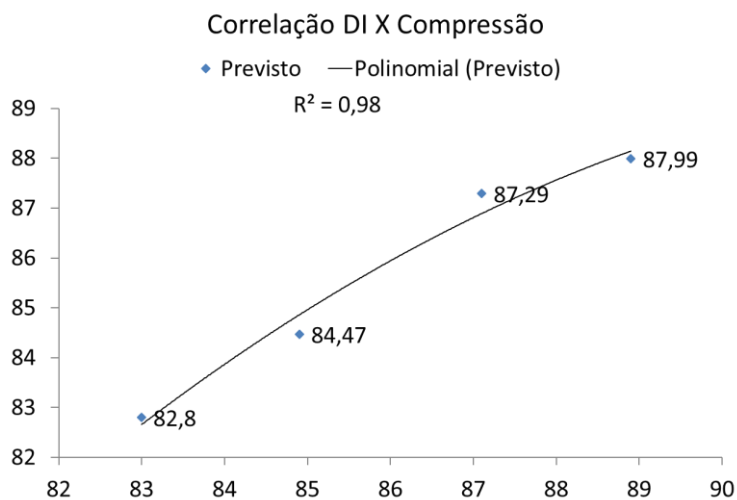


Figura 16: Regressão linear do teste de compressão em leito de coque

A Tabela 2 mostra um comparativo entre os testes de DI e a compressão em leito, mostrando como este mostra-se vantajoso em relação ao tempo de resposta de análise, massa de amostra utilizada, facilidade do teste, menor deterioração no equipamento e melhor ergonomia durante a execução do ensaio.

Tabela 2. Comparativo entre ensaio DI e a compressão em leito de coque.

	DI	Compressão
Massa	10Kg	2Kg
Granulometria	>25,0mm	>25,0mm
Degradação	150 revoluções 15rpm	3500psi
Tempo	10 minutos	1 minuto
Peneiramento	#50, #25, #15	#50, #25, #15

4 CONCLUSÃO

A tensão média de ruptura cresce com o aumento da granulometria, logo conclui que as maiores partículas são as mais resistentes.

O teste de compressão em leito foi satisfatório apresentando uma boa correlação com o ensaio de DI, podendo ser reproduzido em escala laboratorial, mostrando ser uma alternativa inovadora de avaliação da resistência mecânica, onde a partir de um único teste pode-se conhecer a resistência a compressão e correlacionar com um segundo índice que é o tamboreamento.

Agradecimentos

The authors are grateful to GERDAU and UFOP.

REFERÊNCIAS

- 1 Patrick WJ, Clarke E. Mechanical properties of coke and composites. In: Marsh, H. Introduction to Carbon Science. London: Butterworths.1989; cap.7: 229–257.
- 2 Kim SY, Sasaki. Simulation of effect of pore structure on coke strength using 3-dimensional discrete element method. ISIJ Internacional. 2010;50(6):813-821.
- 3 Amanat et al. Metallurgical coke: An investigation into compression properties and microstructure using X-ray microtomography. Scripta Materialia 60: 92-95, 2009.
- 4 ASTM D-346. Standard Practice for Collection and Preparation of Coke Sample for Laboratory Analysis. p.1-5, 2011.
- 5 JIS K 2151, Coke – Testing Methods: Methods for determination of drum indices, p. 21-26, 2004.
- 6 Tavares L.M.M, Microscale investigation of particle breakage applied to the study of thermal and mechanical predamage. Tese de doutorado, University of Utah, EUA.1997.