



ENSAIOS NEUTRONGRÁFICOS DE AMOSTRAS CONFECCIONADAS COM
LIGAS DE CONCRETO ESPECIAL CONTENDO GRANULADOS DE PET
RECICLADO

Antonio Carlos Alves de Moraes

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

Orientadora: Verginia Reis Crispim

Rio de Janeiro

Março de 2011

ENSAIOS NEUTRONGRÁFICOS DE AMOSTRAS CONFECCIONADAS COM
LIGAS DE CONCRETO ESPECIAL CONTENDO GRANULADOS DE PET
RECICLADO

Antonio Carlos Alves de Moraes

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 NUCLEAR.

Examinada por:

Profa. Verginia Reis Crispim, D. Sc

Prof. Ademir Xavier da Silva, D. Sc

Dr. Francisco José de Oliveira Ferreira, D. Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2011

Moraes, Antonio Carlos Alves de

Ensaio Neutronográfico de Amostras Confeccionadas com Ligas de Concreto Especial Contendo Granulados de Pet Reciclado/ Antonio Carlos Alves de Moraes – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

VIII, 110 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Verginia Reis Crispim

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 100-104.

1. Neutronografia. 2. Concreto. 3. Granulados de PET.
I. Crispim, Verginia Reis. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

AGRADECIMENTOS

O processo de construção deste trabalho se realizou graças ao incentivo e apoio de muitos durante o curso de Mestrado:

Aos professores do Programa de Engenharia Nuclear - PEN, pela minha formação e, em especial, aos funcionários da Secretaria, que muito ajudaram neste processo.

À minha orientadora, professora Verginia Reis Crispim, que, pela sua sabedoria e pleno conhecimento da área, soube escolher tão relevante tema para esta pesquisa, além de me guiar com rigor indicando os caminhos do fazer acadêmico usando de paciência para a conclusão deste trabalho.

À Divisão de Reatores do Instituto Engenharia Nuclear - IEN e sua equipe operacional pelo acesso e ajuda nos testes realizados no reator nuclear Argonauta.

Ao professor Romildo D. Toledo Filho e à professora Ana Catarina J. Evangelista por terem me dado acesso aos recursos do Laboratório de Estruturas e Materiais – LABEST/COPPE-UFRJ.

À colega do curso de mestrado, Luciana Rezende, pela colaboração.

Ao Diretor do Colégio Estadual Gonçalves Dias, José Reinaldo Mariano, por ter me apoiado durante este processo.

À minha companheira, Rosane Maria Rocha de Carvalho, pelo amor, estímulo e colaboração.

À minha amiga Marisa Magalhães, pelo apoio e incentivo.

Ao meu irmão Paulo Rodrigues da Costa e ao meu filho Pablo Alves de Moraes, por acreditarem neste projeto de vida.

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

ENSAIOS NEUTRONGRÁFICOS DE AMOSTRAS CONFECCIONADAS COM
LIGAS DE CONCRETO ESPECIAL CONTENDO GRANULADOS DE PET
RECICLADO

Antonio Carlos Alves de Moraes

Março/2011

Orientadora: Verginia Reis Crispim

Programa: Engenharia Nuclear

A pesquisa realizada objetivou inspecionar neutrongraficamente microfissuras em corpos de prova de concreto especial. O feixe de nêutrons térmicos foi extraído do canal J-9, situado na coluna térmica do reator Argonauta/IEN/RJ, onde se encontra instalado o sistema neutrongráfico. Os corpos de prova inspecionados se constituíram de concreto padrão e de concreto modificado com a troca da areia grossa por granulados de PET reciclados, na composição original, tendo forma cilíndrica. Os corpos de prova foram submetidos à compressão numa prensa SHIMADSU UH F 1000, provocando microfissuras. Depois, foram fatiados por uma serra elétrica, em espessuras de 50 mm. Usou-se a solução de nitrato de gadolínio como agente de contraste, para acentuar a visualização das microfissuras. As análises mostraram que a Neutrongrafia é uma técnica de Ensaio Não-Destrutivo conveniente para este tipo de inspeção, ratificada pelo cálculo da ESF e da Modulação do sistema de imagem. Os granulados de PET reciclados atendem às Normas da ABNT e podem ser empregados na construção de casas populares, em concreto estrutural (PP a 25%), pisos de residências (PEAD, a 25% e a 50%) e construções em locais sujeitos a abalos sísmicos, fazendo uma comparação entre as propriedades mecânicas do concreto segundo a engenharia civil (compressão e elasticidade) e os resultados obtidos através das Neutrongrafias.

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

NEUTRONGRAPHICS TESTS OF SAMPLES MADE WITH CONCRETE SPECIAL ALLOYS CONTAINING RECYCLED PET GRANULATES

Antonio Carlos Alves de Moraes

March / 2011

Advisor: Verginia Reis Crispim

Department: Nuclear Engineering

In this research we focused on examining microcracking in body testing of special concrete using thermal neutron radiography. The neutron thermal beam extracted of channel J-9 located at the thermal column of the Argonauta reactor at the IEN-RJ facility, where neutron radiography system is installed. The body testing inspected were made of standard concrete and of modified concrete, where the thick sand was exchanged by recycled PET granulates, rearranged in the original composition and obtained cylinder shape. These body testing were submitted to compression on the press SHIMADSU UH F 1000, producing microcrackings. Then, they were sliced by an electrical saw in 50 mm thickness pieces. It was used a Gadolinio nitrate solution as a contrast agent in order to accentuate the visualization of the microcrackings. This analysis showed that Neutronography is a technique of non destructive testing convenient for this type of inspection, ratified by the ESF and MTF calculus of the image system. The granulated pieces of recycled PET meet the requirements of ABNT standards and can be employed in the construction of popular houses, in concrete for structures (PP at 25 %) or residential floors (PEAD at 25 % and 50 %) and buildings in areas subject to earthquakes, making a comparison between the mechanical properties of concrete according to civil engineering (compression and elasticity) and the results obtained through the Neutron Radiography.

INDICE GERAL

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1- Generalidades	1
1.2- Objetivos	2
1.3- Revisão da Literatura	2

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1- Interação da Radiação com a Matéria	9
2.2- Neutronografia	13
2.3- Fontes de Nêutrons	14
2.4- Método de Exposição Neutronográfica	14
2.5- Moderação	15
2.6- Colimação	16
2.7- Sistema Detector de Imagem Neutronográfica	18
2.8- Indicador de Resolução Visual (IRV)	19
2.9- Formação de Imagem em Filmes Radiográficos	19
2.10- Processos de Aquisição de Imagem Digital	25

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- Granulados de PET Reciclado	26
3.2- Granulometria	27
3.3- Confeção dos Corpos de Prova	31
3.4- Ensaio de Batimento de Tronco de Cone	32

3.5- Moldagem dos Corpos de Prova (CPs)	33
3.6- Corte dos Corpos de Prova	35
3.7- Ensaios de Compressão e Elasticidade	36
3.8- Arranjo Neutronográfico do Reator Argonauta	37
3.9- Qualidade da Imagem Digital	39
3.10- Função de Borda Difusa (ESF)	39
3.11- Função de Modulação de Transferência (MTF)	40
3.12- Emprego de Agente Contrastante nos Ensaios Neutronográficos	41

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1- Ensaios de Compressão Sobre Corpos de Prova	43
4.2- Sistema Neutronográfico Experimental	47
4.3- Largura das Microfissuras Após Compressão dos Corpos	49

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1- Conclusões Sobre os Testes de Compressão e Elasticidade	97
5.2- Conclusões Sobre os Ensaios Neutronográficos	98
5.3- Sugestões	99
Referências Bibliográficas	100
Apêndice A	105

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades:

Um dos assuntos mais comentados ultimamente no mundo, não só pela comunidade científica, mas pelo público em geral, é a conservação do meio ambiente. Muitas ações do homem têm alterado o eco sistema com conseqüências danosas, tais como: o aumento da temperatura global, poluição dos mares, rios e lagoas por esgoto e resíduos tóxicos, poluição do ar, através do lançamento na atmosfera de gás carbônico, enxofre e outros gases não menos danosos.

Dentre tantos agentes poluidores do meio ambiente, os rejeitos sólidos provocam muitas preocupações no tocante à localização de aterros sanitários (lixões) e suas conseqüências, tais como, o chorume.

Os plásticos desempenham também um papel importante, contribuindo para o desastre ambiental. Dentre as várias espécies de plásticos, o politereftalato de etileno (PET), desenvolvido pelos químicos Whinfrild e Dickson, em 1941, é muito utilizado na confecção de garrafas e embalagens, sendo um dos maiores poluidores por não ser biodegradável.

Para se ter uma dimensão do problema, segundo a Associação Brasileira das Indústrias de PET - ABIPET, somente no Brasil foram fabricadas 469.700 toneladas PET, em 2008. Entretanto, a boa notícia, segundo esta Associação, é que esse tipo plástico é totalmente reciclável para outras finalidades, tais como: fibras para vestuário, artesanato e granulados, permitindo várias utilizações.

Os Ensaio Não Destrutivos, END, são um conjunto de técnicas com o intuito de inspecionar materiais diversos sem danificá-los. Os Ensaio Não Destrutivos mais utilizados são: ensaios visuais, líquidos penetrantes, ultra-som, emissão acústica, radiografia industrial (raios X, gamagrafia e Neutronografia), entre outros, segundo a Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos - ABENDE. Essas técnicas fornecem uma das principais ferramentas de inspeção e controle de qualidade de peças e produtos (tubos, válvulas e etc.), em várias áreas de atuação, tais como: petróleo e petroquímica,

naval, eletromecânica, química, aeronáutica, inclusive, mais recentemente, em inspeções de obras de arte, sendo esses alguns exemplos de aplicações dessas técnicas.

No presente trabalho, utilizou-se a técnica neutrongráfica, para se analisar corpos de prova de concreto especial, contendo em sua composição granulados de PET, provenientes da reciclagem, em detrimento da areia grossa, utilizada na confecção da mistura do concreto comum, visando-se colaborar para a conservação do meio ambiente.

1.2 - Objetivos:

O presente trabalho de pesquisa visa realizar Ensaaios Não-Destrutivos de amostras com a técnica de radiografia com nêutrons térmicos (Neutronografia), tendo relevância, no que concerne a se realizar ensaios com amostras de blocos de concreto batido, preparados segundo as Normas ABNT, onde se substituirá parte da areia grossa pelo granulado de garrafas plásticas, objetivando, além da reciclagem desse material:

- (1) A preservação do meio ambiente,
- (2) Reduzir o custo na construção civil, podendo-se utilizar a mistura para construção de casas populares.
- (3) Reduzir o peso estrutural com esta mistura especial de concreto.
- (4) Determinar a quantidade de granulado a ser empregada que garanta a resistência do concreto exigida pelas referidas normas, além da verificação de microfissuras, formadas na própria cura do concreto ou após submissão das amostras às cargas de compressão diversas.

1.3 - Revisão da Literatura:

As primeiras Neutronografias foram feitas em Berlim, nos anos de 1935 a 1938. H. Kallman e Kuhn usaram uma fonte de Ra-Be, um pequeno irradiador de nêutrons, no laboratório de pesquisa do I. G. Farben Aktiengesellschaft, objetivando desenvolver a técnica neutrongráfica. Utilizando esta técnica, O. Peter, no Laboratório Forschungsanstalt der Reichspost, obteve diversas radiografias com nêutrons de objetos, usando uma mais alta intensidade de feixe, fornecida por um acelerador de nêutrons.

Poucas informações estão disponíveis hoje sobre os experimentos nos idos de 1944, antes do exército russo invadir Berlim.

Todos os equipamentos e muitos dos documentos em torno dessas investigações foram perdidos durante a batalha de Berlim em 1944/45.

A pesquisa nuclear no pós-guerra na Alemanha recomeçou 10 anos depois, após a primeira conferência de Genebra conforme (Carl, Otto Fischer, 1992).

A “conferência átomos da paz” de 1955 organizada pela ONU (“United Nations Organization abriu as portas” segundo Barton em 1996. Porém, foi somente em 1961, na conferência sobre difração de nêutrons, ocorrida em Londres, a radiografia com nêutrons ressurgiu, através de J. P. Barton, que utilizou as publicações de Kallman, Peter e Thewlis. Aparentemente, o grupo de J. P. Barton trabalhou sozinho na Europa, entre 1961 e 1965, enquanto outros notáveis, tais como, Watts e Berger desenvolveram seus estudos nos USA (United States of America).

As primeiras publicações sobre a realização de Ensaios Não Destrutivos utilizando nêutrons objetivaram demonstrar o grande potencial de aplicação da técnica neutrongráfica nas áreas de Biologia, na indústria, incluindo trabalhos com a Rolls Royce, Aldermaston (ensaios pirotécnico), Harwell (inspeção de combustível nuclear) (Barton, 1996).

Em 1970, muitos progressos foram alcançados por pesquisadores em Centros de Pesquisa dos Estados Unidos e da Europa. Em 1973, na cidade de Birmingham, na Inglaterra, e, em 1975, na cidade de Gaithersburg, Estados Unidos, foram realizadas revisões sobre NR, visando acompanhar a evolução e o progresso da técnica no mundo.

Em 1976, um compêndio sobre os princípios da NR foi publicado por Tyufyakov e Shtan.

Em 1977, a edição de junho da Atomic Energy Review (vol 15, n^o 2) versou sobre NR.

Em 1979, outro grande passo foi dado, tendo sido criado um grupo de trabalho sobre Neutronografia, coordenado pela Comunidade Européia. O primeiro encontro foi em Riso, Dinamarca, onde os pesquisadores decidiram que encontros anuais subseqüentes seriam realizados nos Centros de Pesquisas da Comunidade Européia.

O grupo publicou um manual sobre Radiografias com Nêutrons, em 1981, e um Atlas sobre detecção de defeitos em elemento combustível nuclear, em 1984. Um livro sobre fundamentos matemáticos e físicos da NR foi publicado por Harms e Wyman, em 1986.

Em 1987 e 1992, Domanus seguiu os mesmos passos, publicando dois livros, sendo o primeiro sobre sistemas colimadores para NR térmicas e o segundo, a respeito dos fundamentos da NR (DOMANUS, 1992).

Pesquisadores da Europa, Estados Unidos e Canadá resolveram se unir para realizar, em 1981, a Primeira Conferência Mundial sobre Radiografia de Nêutrons (First World Conference on Neutron Radiography), organizada em San Diego, EUA, onde cerca de 124 trabalhos foram apresentados.

Em 1986, Paris sediou a Segunda Conferência Mundial. Em 1989, ocorreu no Japão, na cidade de Osaka, a terceira conferência que contou com a participação de aproximadamente 200 especialistas, vindos de mais de 20 países, e a apresentação de 107 trabalhos.

Em 1990, um encontro voltado especialmente para a Neutronografia foi realizado em Pembroke, Ontário, Canadá, onde 28 trabalhos, vários painéis e duas mesas redondas foram apresentados.

Existem muitas publicações sobre NR, mas uma, em forma de Boletim Especial de Radiografia com Nêutrons (Neutron Radiography Newsletter-NRN), de autoria do Dr. J.P.Barton, merece destaque, pois deu origem ao atual Boletim Internacional de Radiografia com Nêutrons (Internacional Neutron Radiography Newsletter- INRNL). Tendo o pesquisador J.C.Domanus como editor; essas publicações incluem reportagens, tais como: as atividades dos inúmeros Centros de Pesquisa, que realizam ensaios neutrongráficos no mundo; informações a respeito das atividades do Grupo Mundial de Radiografia com Nêutrons (Neutron Radiography World Group- NRWG); e contribuições, sobre tópicos especiais de aplicação da Neutronografia.

Em 1992, foi realizada a quarta conferência mundial sobre NR ocorrida nos EUA, e, em 1996, a quinta, na Alemanha. Nessas conferências, foram apresentados em torno de 20 trabalhos em áreas diversas, reatores e instalações nucleares; fontes de nêutrons de pequeno porte; detectores de nêutrons; métodos com filmes fotográficos; métodos usando detectores Sólidos de Traços Nucleares - SSNTD; métodos usando sensores eletrônicos; processamento de imagens; aplicações da Neutronografia em Tempo Real; aplicações nucleares; aplicações Industriais; aplicações em Biologia e Ciências Médicas; aplicações Aeroespaciais; aplicações gerais; Tomografia; padrões e medições dimensionais. A 6 th World Conference on Neutron Radiography, ocorreu em 2001, em Osaka (Japão).

Em 2006, foi realizada, no Instituto de Padrões e Tecnologia (NIST), em Gaithersburg, a oitava 8th World Conference on Neutron Radiography, nos Estados Unidos da América USA, que teve como figura de mérito a obtenção de imagens de NR em Tempo Real.

Em 2010, a Nona Conferência Mundial sobre Neutronografia (WCNR-9), ocorrerá em outubro, na África do Sul, sendo a primeira vez que acontece fora da Europa, do Japão e do Território Americano.

Para o desenvolvimento da pesquisa em apreço, foram consultados vários artigos, a saber:

Em 1977, J.E.S.C. Santos, escreveu sua Dissertação de Mestrado, Neutronografia com Nêutrons Térmicos PEN-COPPE-UFRJ. O autor nesse trabalho desenvolveu e aplicou a Neutronografia como teste não destrutivo utilizando o reator Argonauta, utilizou o método direto para este ensaio, e em vários canais de irradiação inclusive o J-9, avaliou o fluxo dos mesmos, além das doses de gamas e razão de Cádmio nestes canais.

Em 1981, durante First World Conference on neutron radiography, ocorrida em San Diego, USA, o Dr. John Douglas Rogers discorreu sobre a evolução da técnica neutronográfica, nos Centros brasileiros de Pesquisa e sua melhor utilização, apresentam também as principais características dos reatores nucleares disponíveis para realização de diversas inspeções usando-se essa técnica a saber : IEA (IPEN/SP); Argonauta (IEN/RJ); TRIGA (CDTN/BH). Na ocasião, apresentou um levantamento das curvas característica dos filmes existentes no mercado brasileiro, para a realização de uma neutronografia de boa qualidade.

Em 1986 na Second World Conference on Neutron Radiography, realizada em julho em Paris, França, Mo Dawei et al, apresentaram o trabalho Application of Neutron Radiography for the Measurement of the Water Permeability of Concrete, pg 225. Neste trabalho os autores concluíram ser a permeabilidade da água no concreto a mais importante característica e abordaram o problema causado pelos poros no concreto; além da combinação de métodos - tradicional, ou de pressão fixa de água, e neutronográfico - para o acompanhamento do processo de penetração da água no concreto que é um método padrão adotado na China .

Em julho de 1986, durante a Second World Conference on Neutron Radiography, H. C. Aderhold escreveu o artigo, The Cornell Neutron Radiography Facility and its Applications to the Study of the Internal Structure and Microcracking of

Concrete, pg 321. Neste trabalho, o autor mostra a supremacia da Neutronografia sobre o raio-X na verificação de microfissuras em concreto, e o uso do agente contrastante para beneficiar a identificação de microfissuras e vazios de ar que se originam durante a cura do concreto. Também realizou testes de adequação de novos materiais antes e pós-esforços, testes de uniformidade da mistura, principalmente se uma mistura adicional for feita.

Em 1992, durante a Fourth World Conference on neutron radiography, realizada em S. Francisco, USA, J.Haskins et-al, apresentaram um trabalho com o título, Neutron Radiography Standards in the United States of America, pg 985. Aqui, este trabalho mostra que, o primeiro tratado de padrões na indústria que usa Neutronografia foi firmado em 1975; comentam sobre os padrões atuais nas indústrias dos USA, que são divididos em três áreas de maior interesse: padrões comerciais, padrões nucleares e qualificação de pessoal, e também fazem projeções sobre o futuro destas áreas.

Em 1992, na Fourth World Conference on neutron radiography, realizada em S. Francisco, USA, J. C. Domanus publicou Topics for International Standardizations in the Field of Neutron Radiography, pp. 653, J. C. Domanus O autor neste trabalho faz uma curta revisão dos padrões internacionais e nacionais, no campo da radiografia nos USA, em particular, na Radiografia Industrial, a conduta dos padrões radiográficos como a NR são revistas. Tópicos Importantes para os padrões internacionais da NR são discutidos; estes tópicos são: Indicador de Qualidade de Imagem, bibliografia de padrões de referência na NR, medidas de L/D e sensibilidade de filmes radiográficos.

Em 1992, J. C. Domanus, publicou um livro com o título, Practical Neutron Radiography, este livro é o resultado da compilação do trabalho de vários autores membros da World Conference on neutron radiography (WCNR), fazendo deste livro um guia prático sobre Neutronografia, bem como uma revisão de problemas básicos no trato de fontes, detectores e filmes. Também se dedica a comentar os Indicadores de Qualidade, dá uma atenção especial aos combustíveis próprios à Neutronografia e aplicações em outras áreas e as instalações neutronográficas na Comunidade Européia

Em 1995, J. J. G. da Silva, IME- RJ publicou sua dissertação de mestrado com o título, Detecção de Micro-Defeitos por Neutronografia Térmica. Este trabalho concentrou-se na inspeção de amostras, analisadas através da Radiografia com Nêutrons Térmicos para a detecção de defeitos em corpos de prova, enfocando a estrutura interna e a detecção de microfissuras a compressão, usa para estas inspeções um o agente contrastante nitrato de Gadolínio com a intenção de melhorar o contraste na imagem.

Em 1996 realizou-se a Fifth World conference on neutron radiography, ocorrida em Berlin, Germany. Nesta conferência J. P. Barton publicou o artigo, International Neutron Radiography-Past and Future, pg 17. A primeira parte deste trabalho mostra 35 anos de trabalhos de Neutronografia, a partir de 1956, a parte central faz referência às maiores compilações sobre o assunto e na parte final decursa sobre o futuro da técnica neutronográfica.

Em 1996, durante a Fifth World conference on neutron radiography, em Berlin, Germany, S. Brenize, B.Hosticka, publicaram o artigo The use of Contrast Agent in Neutron Radiography Measurements, pg 33. Neste trabalho as autoras apresentam a definição de agente contrastante, e sua relevância na resolução da radiografia, bem como, seu uso que varia de um simples material hidrogenado como a água, óleos e materiais mais exóticos como o Gadolínio e faz um levantamento quantitativo e qualitativo do seu emprego tais como permeabilidade no interior de fissuras e a facilidade de sua remoção, afirma também que o Gadolínio é mais eficiente agente contrastante devido a sua alta seção de choque.

Em 1998 aconteceu a Third World Conference on Neutron Radiography, Osaka, Japan. Juergen Stadel apresentou o trabalho The use of Neutron Radiography for Some Problems in Civil Engineering, pg 653. O autor compara as técnicas Neutronográficas e a radiografia X; feitas, respectivamente em um reator nuclear, 26 MW DIDO, e uma fonte ajustável de raio X, concluindo que a melhor técnica para visualizar materiais plásticos no concreto é a Neutronografia, em comparação com raio X, e no tocante a inspeção da estrutura de aço no concreto padrão, o raio X foi mais eficiente. Além de afirmar que a maior parte dos detalhes da Neutronografia se perde, quando usada uma fonte móvel de nêutrons (LTV mobile Neutron Radiography System), com uma razão de L/D= 12:1.

Em 1998 na mesma Third World Conference on Neutron Radiography, em Osaka, Japan, o Dr. Y.Ikeda et al, publicaram o artigo An Evaluation of Neutron Radiography for Non-Destructive Testing of Defects, pg 305. Neste trabalho é abordado o estudo da técnica neutronográfica para a avaliação de defeitos na estrutura de materiais. Estuda também a sensibilidade da resolução para várias combinações de conversores e filmes de emulsão utilizados na Neutronografia, bem como testes de resolução e contraste usando indicadores de qualidade de imagem, além de observarem, com estas técnicas, finas fadigas no aço.

Em 1998, durante a referida Third World Conference on Neutron Radiography, em Osaka, Japan, H. U. Mast et-al publicaram o trabalho A Comparison of Raio X and

Thermal Neutron Radiography, pg 797. Neste trabalho comparam-se as duas técnicas de ensaios não destrutivos END (NR e raio X) e demonstram sua complementaridade, também afirmam que a essencial vantagem da radiografia X sobre a Neutronografia é a possibilidade de se obter raio X em uma variada faixa de energia; afirmam também que se podem obter radiografias com alta resolução, usando raio X de baixa energia e aponta a vantagem da Neutronografia em termos de tempo de exposição.

Em 2006, F. M. Resende, apresentou o seu Exame de Qualificação Acadêmica para Doutorado, PEC / COPPE / UFRJ, com o título a Influência de Raspas de Borracha de Pneus e de Fibras de Aço no Amortecimento do Concreto. Neste trabalho é proposta a adição de raspas de borracha na composição do concreto padrão, tendo como resultado uma menor resistência a compressão, porém uma melhor acomodação ou maleabilidade.

Em 2006, C. L. Lang, apresentou sua Dissertação de mestrado, PPEC/ UFSC, sob o título Avaliação da Areia Britada de Origem Basáltica Lavada e não Lavada para Utilização em Concreto à Base de Cimento Portland. Neste trabalho o autor demonstra que a areia britada pode ser usada na constituição do concreto em detrimento da areia de rio, mas para isso é necessário atender a norma da ABNT 7211 / 05, que limita o uso de material pulverolento; para isso é necessária a lavagem da mesma, constroem também diagramas de dosagem e verificam a diferença entre o estado fresco e o endurecido.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 - Interação da Radiação com a Matéria:

Basicamente, podem-se classificar as radiações nucleares em dois grupos: partículas carregadas e radiação sem carga. No primeiro grupo, encontram-se as partículas α , negatrons (β^-) e os pósitrons (β^+), partículas de mesma massa do elétron e carga positiva, prótons e fragmentos de fissão. No segundo grupo, encontram-se as radiações eletromagnéticas, raios X e raios γ , e os nêutrons

Os raios X são radiações eletromagnéticas que acompanham transições eletrônicas e também pode ser produzido pelo efeito de freamento. O processo envolve um elétron passando bem próximo a um núcleo do material alvo. A atração entre o elétron carregado negativamente e o núcleo positivo faz com que o elétron seja desviado de sua trajetória perdendo parte de sua energia. Esta energia cinética perdida é emitida na forma de um raios X, que é conhecido como "bremsstrahlung" ("braking radiation") ou radiação de freamento, isso é, quando um elétron é desacelerado em interação com o núcleo do material alvo e os raios gama (γ) acompanham transições nucleares. Os nêutrons, partículas constituintes do núcleo atômico, e sem carga interagem de forma peculiar com os núcleos alvos dos elementos, $^A X_Z$.

Na emissão da radiação gama $^A X_Z^*$, o núcleo que está excitado, passa para um estado de mais baixa energia $^A X_Z$. A diferença entre estes dois níveis de energia é liberada sob a forma de fótons da seguinte forma:

$$^A X^* \rightarrow ^A X_Z + \gamma, \quad \text{onde } * \text{ representa o estado excitado.}$$

Este tipo de decaimento se caracteriza pela emissão de um ou mais fótons monoenergéticos, que podem ocorrer em cascata, ou seja, um núcleo excitado pode emitir vários fótons, antes de alcançar seu estado fundamental.

Existem várias formas das radiações eletromagnéticas interagirem com a matéria, porém, três delas são mais prováveis de ocorrer, através dos efeitos: Fotoelétrico, Compton e Produção de Pares. O efeito fotoelétrico se caracteriza pela transferência total da energia do fóton para um elétron constituinte do alvo, geralmente, da camada K, que é ejetado do orbital com energia cinética bem definida.

$$E_{kc} = h\nu - E_B \quad (2-1)$$

E_{kc} é a energia cinética

ν é a frequência

E_B é a energia de ligação

h é constante de Planck

Esse efeito ocorre predominantemente para baixas energias e elementos de alto Z .

O efeito Compton ocorre na interação do fóton com um elétron livre do material alvo ou com elétrons ligados quando a energia do fóton é muito maior que a energia de ligação do elétron. Nesse tipo de interação, nem toda energia do fóton é transferida para o elétron, ocorrendo o espalhamento do fóton com menor energia que a original. O comprimento de onda final λ , do fóton é função do ângulo de espalhamento, Φ . (GRIFFITHS, D. J., 1999)

$$\lambda - \lambda_0 = \alpha + (1 - \cos\Phi) \quad (2.2)$$

Onde $\alpha = h/mc$

A produção de pares ocorre no campo Coulombiano do núcleo, onde o fóton desaparece, surgindo duas partículas, um elétron e um pósitron, este processo ocorre para energias maiores que 1,02 MeV ($2mc^2$) e para elementos de alto Z . As duas antipartículas se recombinam, dando origem a dois fótons de energia 0, 511 MeV, que se propagam em sentidos opostos.

Os nêutrons diferentemente das radiações citadas, não interagem com os elétrons, mas, sim, com o núcleo alvo. Devido à inexistência de carga e por ser uma partícula razoavelmente pesada, ela interage diretamente com os núcleos envolvidos.

O nêutron foi detectado pela primeira vez, em 1932, pelo físico inglês James Chadwick. Para conseguir seu intento, Chadwick se valeu do princípio da conservação da quantidade de movimento, no qual a quantidade total de movimento será igual a zero se o total das forças externas que atuam no sistema for nulo, sendo que doze anos antes, Rutherford previu a existência de uma partícula de massa igual a do próton, mas não provou sua existência.

A interação do nêutron com o núcleo alvo envolve dois processos de interação: espalhamento e absorção (LAMARSH, J.R., 1978). No espalhamento elástico (n, n'), o núcleo não sofre mudanças em sua estrutura nuclear e o nêutron continua existindo,

após a interação, ocorrendo uma simples transferência de momento linear e energia cinética.

Na absorção o nêutron se agrega com o núcleo; a energia não é conservada, sendo parte dela usada para excitar o núcleo que, posteriormente, tende a seu estado fundamental, através de vários fenômenos, dos quais os principais são:

- a) Espalhamento inelástico (n, n') , $(n, n\gamma)$ - o nêutron deve ter energia superior a certo limiar, posteriormente o núcleo pode emitir um raio gama para atingir seu estado fundamental.
- b) Captura radioativo – o núcleo composto formado, para atingir seu estado fundamental, emite um ou mais fótons ou partículas tais como (n,p) , $(n,2n)$, (n,γ) , (n,α) .
- c) Fissão nuclear – o núcleo composto é dividido em dois ou mais fragmentos e em média são produzidos dois ou três nêutrons.

A interação de nêutrons com a matéria é representada pela probabilidade de nêutrons serem espalhados ou absorvidos, representada pela soma das seções de choque microscópicas de espalhamento (σ_e) e a seção de choque microscópica absorção (σ_a) a equação 2.3 é expressa em unidades barn (b), que corresponde a 10^{-24} cm^2 .

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_e \quad (2.3)$$

A seção de choque macroscópica para nêutrons é representada pelo símbolo Σ , sendo $\Sigma = \sigma N$, onde N é a densidade de núcleos dado por: $N = N_a \rho / A$, sendo N_a o número de Avogadro que equivale $6,02 \times 10^{23}$ átomos por mol, ρ , a densidade física dada em gramas por cm^3 e A o número de massa expresso em gramas.

A atenuação de um feixe de nêutrons num dado material é do tipo exponencial, conforme a expressa a equação 2.4:

$$I = I_0 e^{-\Sigma x} \quad (2.4)$$

onde:

I - é a intensidade do feixe neutrônico após atravessar uma espessura x do material;

I_0 - é a intensidade do feixe neutrônico incidente;

Σ - é a seção de choque macroscópica total para nêutrons com energia E.

x - é a espessura do material

A atenuação dos nêutrons depende, então, das seções de choque, que, por sua vez, dependem da energia dos nêutrons e do material alvo. A seção de choque de absorção, para muitos núcleos em baixa energia, varia inversamente com a velocidade ($1/v$). Nêutrons de baixa energia (térmicos) são de particular interesse, conforme se observa na figura 2.1. A probabilidade de interação do nêutron com a matéria depende dos elementos que compõem o material, cujo comportamento, diferentemente dos raios X, que apresentam um comportamento contínuo, é randômico. Nota-se também que a seção de choque total para nêutrons, nesta faixa de energia, é significativamente superior ao coeficiente de atenuação para raios X de 100 keV para materiais, tais como, o hidrogênio e elementos de baixo número atômico (Z). Por outro lado, a probabilidade de interação dos raios X com os elementos de alto Z é maior que a probabilidade de interação dos nêutrons térmicos, com eles, a saber: Pb, U, e Bi.

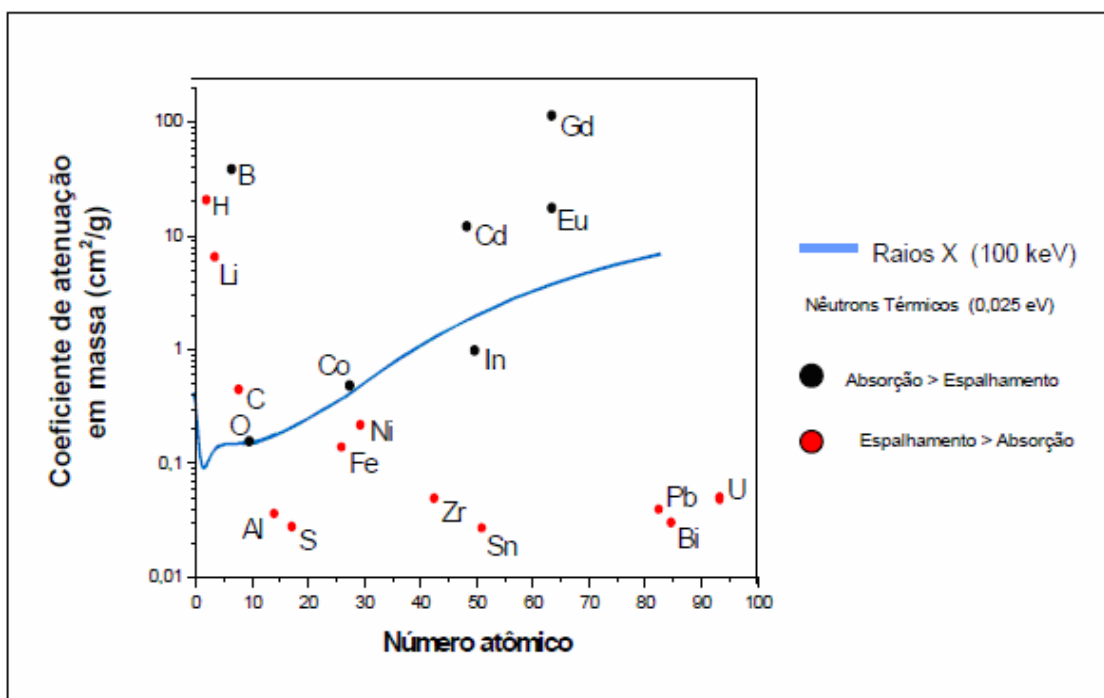


Figura 2.1: Seção de choque de absorção em função do número atômico dos materiais (Ferreira, 2003)

Os nêutrons, assim como os raios X e os raios- γ , podem ser produzidos numa larga faixa de energia, apresentando propriedades de atenuação substancialmente

diferentes, em função da energia. A divisão dos nêutrons em grupos de energia, segundo Berger é mostrada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 Classificação de nêutrons em função da energia (BERGER, H., 1963).

CLASSIFICAÇÃO	FAIXA DE ENERGIA
Nêutrons Lentos	$0 < E < 10^4$ MeV
Nêutrons Frios	$E < 0,01$ MeV
Nêutrons Térmicos	$0,01 < E < 0,3$ MeV
Nêutrons Eptérmicos	$0,3 < E < 10^4$ MeV
Nêutrons Rápidos	$10^4 < E < 20$ MeV
Relativístico	$E > 20$ MeV

Os nêutrons térmicos são aqueles que estão em equilíbrio térmico com o meio à temperatura ambiente. Isto acontece quando o nêutron, ao atravessar a matéria, sofre colisões, perdendo energia até que atinja uma distribuição em equilíbrio com a dos átomos e moléculas do meio. No equilíbrio, os nêutrons térmicos apresentam uma distribuição de velocidade do tipo Maxwelliana e a energia mais provável tem o valor de 25 meV a 20 °C. Em trabalhos experimentais, consideram-se nêutrons térmicos aqueles que possuem energias abaixo de 0,4 eV, o que corresponde a uma diminuição brusca na seção de choque de absorção do cádmio (DE MENEZES, 2000).

2.2 - Neutronografia

A radiografia com nêutrons é uma técnica muito similar à empregada nas radiografias convencionais com raios X e raios γ . A obtenção de uma Neutronografia convencional envolve três componentes: um fluxo de nêutrons apropriado, o objeto a ser investigado e um dispositivo registrador contendo filme radiográfico com conversor de nêutrons em radiação secundária capaz de sensibilizar o filme. Também podemos obter Neutronografias em tempo real, que é uma técnica que nos permite observar eventos ao mesmo tempo em que eles ocorrem. Um sistema Neutronográfico em tempo real se utiliza da fonte de nêutrons, colimadores, filtros e um sistema de imageamento, que é composto por: uma tela cintiladora, câmera de vídeo, monitor de imagens e um computador. Outra forma de se obter uma radiografia com nêutrons é utilizando um registrador plástico e um conversor que emite uma partícula carregada. Quando uma

partícula carregada perde energia ao penetrar em um dielétrico, ela produz ao longo de sua trajetória uma zona danificada com largura da ordem de Angstroms. No caso dos Solid State Nuclear Track Detectors (SSNTD), a largura deste dano é ampliada, após o detector ser submetido a um tratamento químico adequado, resultando que o traço revelado da partícula pode ser observado ao microscópio óptico. No presente trabalho, usar-se-á o método direto.

2.3 - Fontes de Nêutrons

As fontes de nêutrons podem ser reunidas em três grupos:

- Aceleradores de partícula
- Fontes isotópicas
- Reator nuclear.

Neste trabalho utilizou-se como fonte de nêutrons térmicos um reator nuclear.

Hoje em dia, a maioria das radiografias com nêutrons é feita utilizando-se um reator nuclear. Os reatores são as fontes preferidas por possuírem alto fluxo de nêutrons da ordem de $10^{10} \text{ n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, possibilitando boa qualidade de imagens, em termos de resolução, e curto tempo de exposição. Existem desvantagens, tais como: o alto custo de operação e a complexidade de engenharia (CRISPIM, 1993).

2.4 - Métodos de Exposição Neutronográfica:

Existem dois métodos de exposição para a Neutronografia: o método direto e o indireto ou por transferência. No método direto, o objeto, o filme e o conversor são colocados juntos na direção do feixe de nêutrons como mostra a figura 2.2.

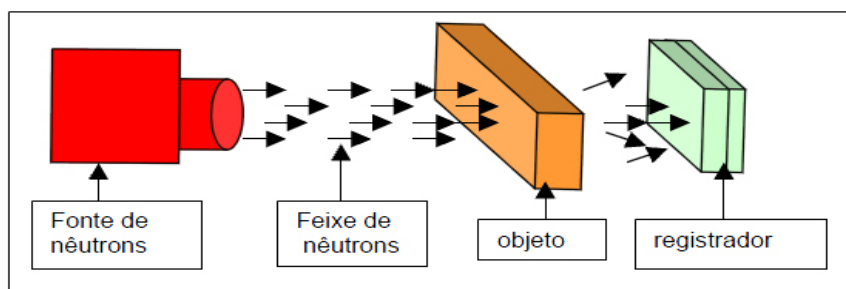


Figura 2.2 - Desenho esquemático do método direto (LIMA, C.T.S., 2005).

Os conversores usados no método direto são escolhidos pela propriedade de baixa ativação. O conversor metálico de gadolínio é o que apresenta melhores características para este método de exposição. O método direto não é aconselhável quando desejamos inspecionar uma amostra constituída de material radioativo, sendo recomendável, então o uso do método indireto. (SILVA, J. J.G., 1995). No método indireto ou de transferência, diferentemente do anterior, somente o objeto e o conversor são expostos ao feixe de nêutrons e os conversores são escolhidos dentre materiais de alta ativação.

No presente trabalho, será usado o método direto na obtenção das imagens, porém, o método indireto tem suas vantagens em algumas situações. (DOMANUS, 1992).

2.5 - Moderação:

Os nêutrons são gerados com energias em torno de 2 MeV, em um reator nuclear, e com 14 MeV num acelerador de partículas, para se realizar uma neutrongrafia térmica torna-se necessário, termalizá-los. Para isso, um material moderador deve ser empregado, sendo empregado materiais com alta probabilidade de espalhar os nêutrons (grande seção de choque de espalhamento), e baixa seção de choque de absorção. Uma forma de se expressar o processo de perda de energia é através do decréscimo médio do logaritmo da energia do nêutron por colisão.

$$\xi = 1 + \alpha / 1 + \alpha \ln \alpha \quad (2.5)$$

Sendo
$$\alpha = (A-1)^2 / (A+1)^2$$

onde A é o número de massa do material moderador.

A razão de moderação, R_m , expressa a capacidade de o moderador espalhar os nêutrons e de pouco absorvê-los. Essa razão é dada por:

$$R_m = \xi \Sigma_s / \Sigma_a \quad (2.6)$$

onde Σ_s e Σ_a são as seções de choque macroscópicas de espalhamento e absorção, respectivamente, R_m , deve ser o maior possível para uma moderação eficiente (CRISPIM,1975).

2.6 - Colimação:

Num arranjo neutronográfico, o colimador é uma peça muito importante, pois regula a intensidade de nêutrons térmicos que atingirá o plano da imagem e a resolução geométrica da Neutronografia. Segundo J. P. BARTON, 1967: “Na radiografia com nêutrons, a forma do colimador, pode ser de igual importância que a escolha da fonte de nêutrons e do método de irradiação”.

Um colimador é caracterizado pela sua razão L/D , onde L é distância da fonte ao filme radiográfico e D , o diâmetro ou a largura de abertura do colimador, conforme mostra a figura 2.3. Quanto maior for esta razão melhor será a resolução da imagem, pois o tamanho da região de penumbra, U_g (unsharpness) é inversamente proporcional a L/D sendo dada por:

$$U_g = D/L \quad (2.7)$$

Pode-se estimar o fluxo de nêutrons entre a entrada e a saída no colimador, dado por:

$$\Phi = \Phi_0 A / 4\pi L^2 \quad (2.8)$$

Onde:

Φ – é o fluxo de nêutrons na saída;

Φ_0 – é o fluxo de nêutrons na entrada;

A – é a área da base ou abertura do colimador;

L – é o comprimento do colimador.

Sendo circular a abertura do colimador, tem-se que:

$$\Phi_0/\Phi = 16(L/D)^2 \quad (2.9)$$

Observa-se que, quanto maior for a razão L/D , menor será o fluxo no plano da imagem. Há um comprometimento entre a intensidade do feixe e a resolução geométrica de um sistema neutrongráfico. Quanto maior for L e quanto menor D , mais se aproxima de uma fonte puntiforme. Entretanto, nesse caso, a intensidade de nêutrons no plano de imageamento será menor. Assim sendo, o projeto do colimador é de suma importância na Neutrongrafia.

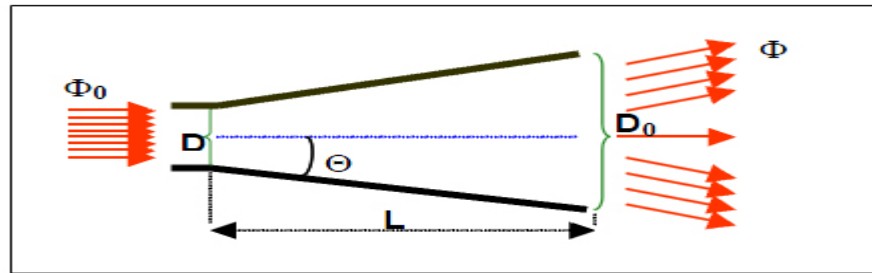


Figura 2.3: Desenho esquemático de um colimador divergente (LIMA, C.T.S., 2005).

São empregados dois tipos de colimadores: paralelos e divergentes, ou a junção deles. Um colimador paralelo cuja vista em corte pode ser observada na figura 2.4 (a), poderá ter uma razão L/D maior, para um mesmo L e menor abertura de entrada, que um divergente, porém, a área útil de inspeção será menor.

O uso de um colimador do tipo divergente, mostrado na figura 2.4 (b), aumenta a área de inspeção neutrongráfica. Como a grafita tem baixa probabilidade de absorver nêutrons, sendo ótimo espalhador de nêutrons, é usado como material estrutural para o colimador. Para o alinhamento do feixe neutrônico, é recomendável o revestimento de cádmio (Cd), nas bordas extremas do colimador, já que ele é um bom absorvedor de nêutrons térmicos, o Cd absorverá os nêutrons espalhados que poderiam prejudicar a imagem neutrongráfica.

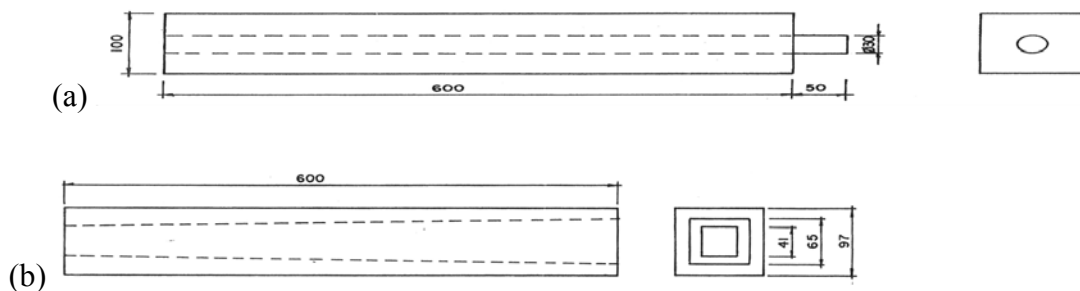


Figura 2.4: (a) Vista em corte, medidas em cm, de um colimador em paralelo, (b) Vista em corte, de um colimador divergente. (SANTOS, J.E.S.C., 1977).

2.7 - Sistema Detector de Imagem Neutronográfica:

Os nêutrons são radiações altamente penetrantes devido a sua neutralidade em termos de carga elétrica. A baixa probabilidade dos nêutrons interagirem com núcleos de prata presentes na estrutura granular do filme radiográfico pouco o sensibiliza. Para contornar esta dificuldade, usam-se os conversores de radiação, ou seja, materiais que devem possuir uma alta seção de choque de absorção de nêutrons térmicos e que, após essa absorção, emitam uma partícula ou radiação capaz de sensibilizar o filme radiográfico. A figura 2.5 mostra o comportamento da seção de choque microscópica total, em função da energia dos nêutrons, para diversos materiais.

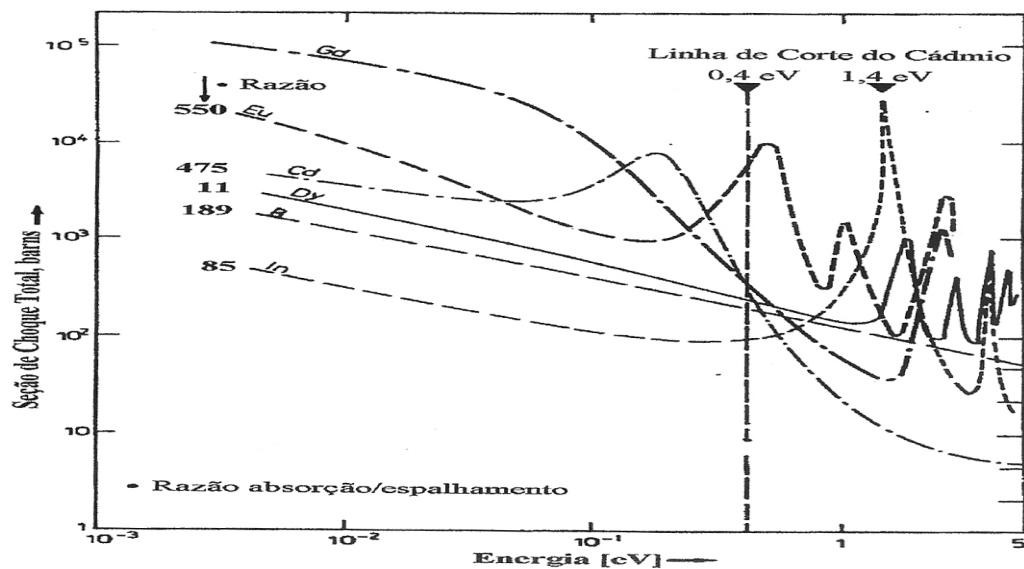


Figura 2.5: Seção de Choque microscópica total em função da energia dos nêutrons (SILVA, J.J.G., 1995). A figura 2.6 mostra o desenho esquemático de um arranjo neutronográfico.

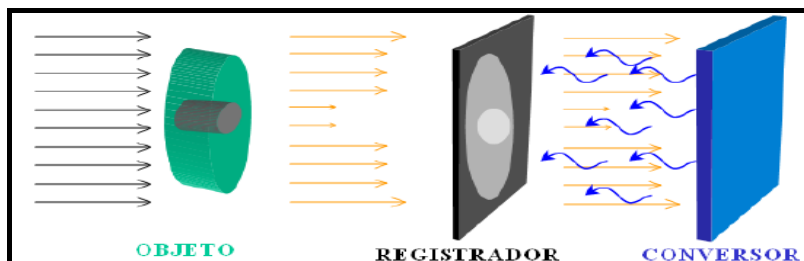


Figura 2.6: Desenho representativo de um arranjo neutronográfico (FERREIRA, F.J.O., 2003).

Na tabela 2.3, encontram-se listados alguns dos mais utilizados conversores de nêutrons e seus parâmetros característicos, tais como: coeficiente de absorção de nêutrons térmicos em mm^{-1} ; reações nucleares predominantes; meia vida; tipo e energia de emissão; composição da tela conversora e espessura da tela.

2.8 Indicador de Resolução Visual (IRV):

Segundo a ASTM E545-86 (American Society for Testing and Materials), são recomendados dois indicadores de qualidade IQ de imagens neutrongráficas: IPF (Indicador de Pureza do Feixe) e o IRV (Indicador de Resolução Visual), que devem ser usados em conjunto, para se avaliar a qualidade da imagem neutrongráfica obtida. O IRV foi construído segundo as normas da ASTM, figura 2.7 com as seguintes características, numa chapa de cádmio de 0,5mm de espessura, com 04 orifícios de 1 mm de diâmetro, localizados no centro da placa e separados pela mesma distância de seus diâmetros, e mais 7 orifícios de cada lado dos anteriores, cada um com 0,25mm de diâmetro, espaçados pelo comprimento igual ao de seus diâmetros.

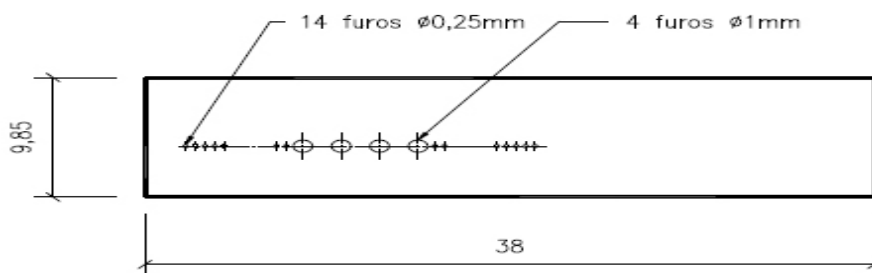


Figura 2.7 Indicador de Resolução Visual (IRV) (BARBOSA, A.L.N, 2008)

2.9 - Formação de Imagem em Filmes Radiográficos:

O filme radiográfico é um elemento fotossensível que sofre alteração física quando exposto aos efeitos de radiação eletromagnética, luz, calor, umidade, produtos químicos e manuseio inadequado. Eles têm por finalidade transformar a variação da intensidade da radiação registrada pelo filme (imagem latente) em imagem visível, após o seu processamento químico. Apresenta propriedades físicas, relacionadas à sua constituição, quanto aos tipos de base; característica da emulsão fotográfica; espessura; resistência; uniformidade da superfície; flexibilidade; grau de absorção de agentes químicos. Quanto às propriedades fotográficas, são avaliadas por: densidade ótica (grau

Tabela 2.3: Propriedades de alguns materiais usados como conversores de nêutrons térmicos (SILVA, J. J. G., 1995)

Material	Coefficiente de absorção de nêutrons térmicos	Reação nuclear predominante	Meia-vida do emissor de radiação	Tipo de energia da radiação ionizante	Composição típica da tela	Espessura da tela
${}^6_3\text{Li}$	0,90 NE (426)	(n, α)	0	α (2,05 Mev)	${}^6\text{Li F} + \text{ZnS}$	250 μm
${}^{10}_5\text{B}$	48,4(B ₄ C)	(n, α)	0	α (1,47 Mev)	${}^{10}\text{B}_4\text{C}$	5 μm
${}^{\text{nat}}_{44}\text{Gd}$	140,3	(n, γ)	0	EC 1,71 Kev	Folha metálica	25 μm
${}^{\text{nat}}_{44}\text{Dy}$	3,01	(n, γ)	2,3 h	β (1,28Mev)	Folha metálica	100 μm
${}^{\text{nat}}_{49}\text{In}$	0,73	(n, γ)	54 min	β (1,00Mev)	Folha metálica	250 μm

de enegrecimento de regiões distintas do filme); sensibilidade (capacidade de registrar variações a intensidade da interação); contraste (diferença de densidade ótica, D.O.,

variando em escalas de níveis de cinza), latitude (faixa de exposição na qual o filme responde com D.O. relativa a uma exposição de referência). O filme fotográfico é composto de uma base onde possui um material transparente e levemente azulado (poliéster, polietileno ou acetato de celulose) com $\pm 180 \mu\text{m}$ de espessura. O material da base possui estabilidade dimensional (baixa dilatação), boa flexibilidade e resistência à alteração de temperatura (baixa probabilidade de combustão) e sua superfície é hidrorrepelente. O substrato é o meio de adesão entre emulsão e a base, contribuindo para a boa distribuição da emulsão sobre a superfície da base. A emulsão fotográfica (gelatina) exerce a proteção dos cristais de prata contra a abrasão e o atrito, evitando que um filme cole no outro. O revestimento ou capa protetora é constituído de substância foto-sensível (haletos de prata “Ag + Br” ou “Ag + I”), possui uma espessura de aproximadamente $10 \mu\text{m}$ e mantém os haletos de prata uniformemente distribuídos.

A figura 2.8 apresenta a disposição dessas camadas. Os filmes podem ser de emulsão simples ou dupla, sendo que a dupla possui as seguintes características: maior sensibilidade; maior interação com menor intensidade de radiação; maior nitidez (resolução espacial).

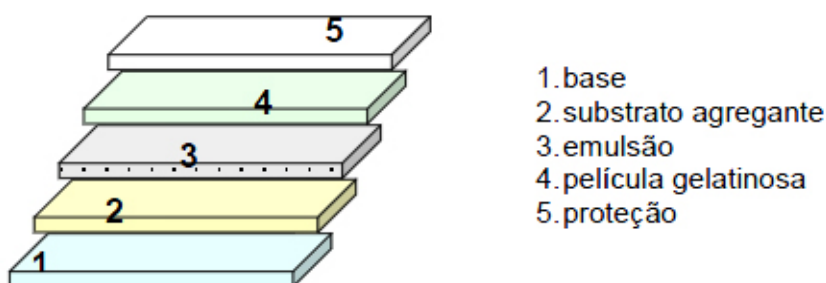


Figura 2.8: Estrutura de um filme radiográfico com emulsão simples (LIMA, C.T.S., 2005).

A interação da radiação eletromagnética com os cristais de prata provoca uma mudança física nos haletos com grau variável de densidade, denominada Imagem Latente, sendo que a visualização desses centros de revelação somente será possível, após o processamento químico do filme. São propriedades fotográficas de um filme radiográfico a se considerar: exposição radiográfica; densidade óptica (D. O.), contraste radiográfico; e velocidade de sensibilização.

A exposição é a quantidade de fótons que atinge determinada área do filme, sendo responsável pela densidade fotográfica (densidade óptica) no filme revelado. Para se determinar o tempo de exposição (E) devemos multiplicar o intervalo de tempo (T) em que este filme foi exposto pela intensidade do feixe de radiação (I), conforme a equação

$$E = I T \quad (2.10)$$

A densidade Óptica (DO) é o grau de enegrecimento da imagem formada no filme. Quanto maior for a densidade ótica, menor será a intensidade de luz transmitida pela radiografia, conforme mostra na figura 2.9. Ela é expressa pela equação matemática abaixo:

$$D = \log (I_0 / I) \quad (2.11)$$

onde:

D é a densidade ótica resultante;

I_0 é a intensidade de luz incidente sobre a chapa radiográfica;

I é a intensidade de luz que atravessa chapa radiográfica.

O contraste radiográfico é a capacidade do sistema de registrar, em termos de densidade ótica, a diferença dos graus de exposição (níveis de cinza), resultantes do tipo de interação da radiação com o material do objeto. Quanto mais enegrecido estiver o filme, em relação a uma área vizinha, maior será o contraste no filme, conforme se observa na figura 2.10.

Assim sendo um filme de maior contraste se caracteriza por apresentar um maior aumento de densidade ótica, em relação a um pequeno deslocamento na varredura espacial da radiografia e a curva que representa a variação de densidade ótica versus varredura espacial apresentará uma maior inclinação, para um filme radiográfico de maior contraste.

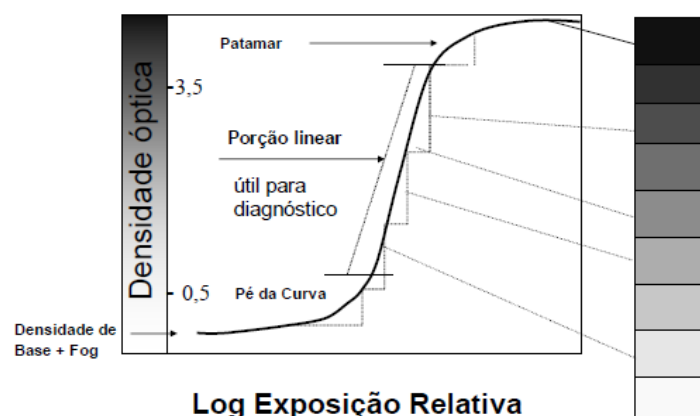


Figura 2.9 Curva Característica de um filme radiográfico (BARBOSA,A.L.N.,2008).

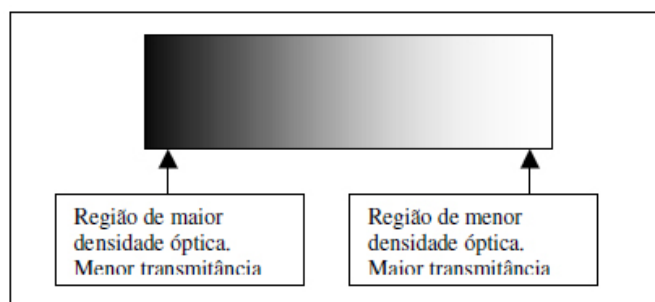


Figura 2.10: Densidade óptica em função do grau de enegrecimento (BARBOSA, A.L.N.,2008).

A velocidade é a medida da sensibilidade do sistema, determinada pela exposição. O filme é considerado rápido ou lento, de acordo com sua sensibilidade à radiação. Os filmes rápidos necessitam de menor exposição do que os sistemas mais lentos. O processamento do filme é um dos fatores de grande importância para obtermos uma imagem de boa qualidade, onde o contraste e a curva característica aumentam com o tempo de revelação, até a saturação. O processamento de imagens é composto pelas seguintes etapas.

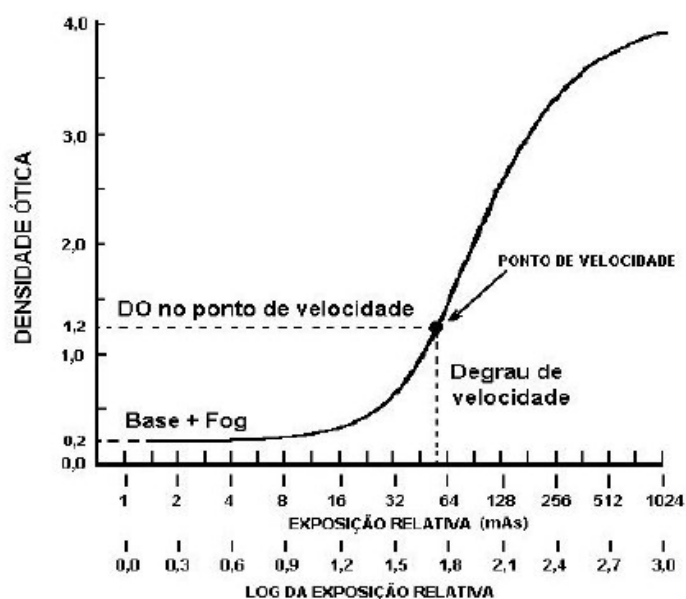


Figura 2.11 : Curva característica de um filme radiográfico.

O processamento do filme é um dos fatores de grande importância para obtermos uma imagem de boa qualidade, onde o contraste e a curva característica aumentam com o tempo de revelação, até a saturação. O processamento de imagens é composto pelas seguintes etapas.

Revelação é a reação que transforma a imagem latente em visível, reduzindo os haletos de prata afetados pela luz em prata metálica opaca. No processamento manual, a instrução do fabricante Kodak é que a temperatura de revelação deverá estar na faixa de 13° até 27°, sendo a média ideal de 21°. No processo de revelação, é necessária uma agitação contínua e suave do filme, que deve ser em torno de 20% do tempo de revelação, para que a gelatina do filme não se embebede com o agente revelador e não se formem bolhas de ar resultante da interação química entre os dois.

Interrupção é para que cesse a ação reveladora, através de um agente químico apropriado ou água que deverá ser utilizado antes de se proceder à etapa seguinte, ou seja a fixação da imagem.

Fixação é a ação que transforma a imagem revelada em imagem permanente, eliminando os resíduos, de forma a manter somente a prata. A solução fixadora é uma combinação de substâncias químicas que torna a imagem estável, quando exposta à luz branca. O tempo de fixação é cerca de duas vezes o tempo de revelação. No processo de fixação também é necessário o agitar o filme para que o processo de fixação se acentue e não se formem bolhas de ar que manchariam a radiografia e reduziria sua resolução fotográfica.

O processo de lavagem elimina da gelatina do filme os sais solúveis de prata. Depois de inteiramente fixada, a radiografia é colocada num tanque de água corrente para lavagem final por cerca de 30 minutos. Se a lavagem não for eficaz, a radiografia pode apresentar manchas. A lavagem deve ser feita num tanque com circulação contínua de água.

A secagem ocorre depois da lavagem, quando as chapas são colocadas numa secadora ou devem ser deixadas secar naturalmente, verificando-se se a distância que as separa é suficiente para mantê-las afastadas e não encostarem umas nas outras.

2.10 - Processos de Aquisição de Imagem Digital:

A imagem digital consiste numa matriz, onde cada elemento da matriz, A_{ij} , é um pixel, que representa um valor numérico ou uma tonalidade de cor. Esta imagem é armazenada na forma de dígitos binários, denominados bits, que são usados para representar os pixels e, conseqüentemente, as diferentes tonalidades de cinza, ou seja, 2^x (x = número de bits) equivale ao número de níveis de cinza. Existem várias formas de aquisição de imagens digitais e, entre essas, está a digitalização de filmes.

Para obtermos uma imagem digital, usamos um digitalizador (scanner) de transmissão para a imagem registrada no filme radiográfico. O scanner é um dispositivo dotado de rolamentos, guia de luz e uma fotomultiplicadora. Enquanto o laser de luz percorre o filme, a luz dos fótons de luminescência é transportada para a foto multiplicadora, que tem a função de coletar essa luz e transformá-la em pulso de corrente elétrica, que será armazenada pelo computador.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Granulados de PET Reciclados:

No presente trabalho foram realizados ensaios neutrongráficos de corpos de prova de concreto especial, substituindo, na mistura de concreto padrão, um de seus compósitos por granulados de PET reciclados (Polipropileno- PP e Poliestileno de Alta Densidade- PEAD). Após submetê-los a esforços de compressão da ordem de MPa, foram realizadas Neutronografias para visualização das microfissuras ocorridas, devido às diferentes compressões a que foram submetidos, com o objetivo de se comparar às ocorridas no concreto padrão, quando submetidos aos mesmos esforços.

O Polietileno Tereftalato (PET) é muito utilizado em diversas áreas e, com base em alguns trabalhos desenvolvidos, são ressaltadas as seguintes propriedades termoplásticas:

- a) alta resistividade ao rompimento;
- b) alta resistividade a tração;
- c) resistência à mudança de temperatura (GOMES, C. A, 2003), disponível na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do PET (GOMES, C. A, 2003).

Resistividade mecânica do PET	ÍNDICE	UNIDADE
Resistividade tração	20-30	MPa
Tensão de ruptura	25	MPa
Deformação	20-100	%

Para a inserção do compósito (PET) na mistura, mediu-se suas propriedades físicas cujos valores estão apresentados na tabela 3.2.

Os valores da densidade dos materiais (PEAD e PP) influenciam na produção da mistura, pois o “traço” do concreto especial deverá se alterar, com relação ao do concreto padrão.

Tabela 3.2: Densidades medidas do granulado de PET, em (g/cm³).

Material	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D _{Med}
PP	1,4073±0,0003	1,4075±0,0001	1,4072±0,0003	1,4088±0,0003	1,4
PEAD	0,9029 ± 0,0000	0,9027±0,0002	0,9028±0,0001	0,9027±0,0001	0,9

Para se obter as densidades do PP e PEAD usou-se o aparelho PICNÔMETRO, disponibilizado pelo Laboratório de Estruturas, LABEST/COPPE/ UFRJ. Primeiramente, a amostra do granulado PP foi colocada na quantidade de 5,86 g num recipiente apropriado.

Como as incertezas das medidas foram muito pequenas, a densidade do granulado PP resultou em 1,4 g/cm³. Para a medida do granulado PEAD, foram colocadas 3,89 g no recipiente anterior, obtendo-se as densidades listadas na tabela 3.2. Da mesma forma, a densidade física do PEAD resultou no valor de 0,9 g/cm³.

Na tabela 3.2, observa-se que o granulado PP é bem mais denso que o PEAD, o que acarretará uma proporção diferente nas misturas dos concretos especiais com os quais serão produzidos os corpos de prova.

3.2 - Granulometria:

Após o levantamento das densidades físicas dos materiais, caracterizou-se o material (granulado de PET), levantando-se a curva granulométrica correspondente, para decidir qual o compósito do concreto padrão seria substituído por ele, de modo a se produzir o “concreto especial”.

A distribuição granulométrica dos materiais (areias e pedregulhos) foi obtida, através do processo de peneiramento, utilizando-se, para isso, peneiras com aberturas de malha, segundo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT/NBR5734/80, mostradas na figura 3.1.

Em primeira análise, descartou-se o emprego do granulado de PET, no lugar das britas devido a sua baixa granulometria.

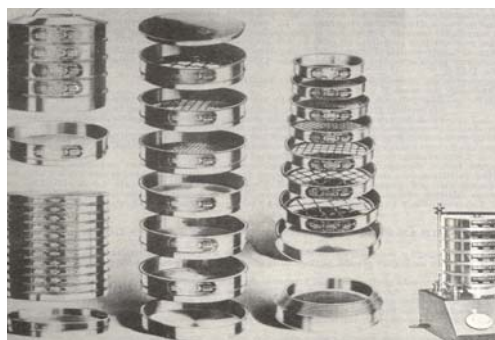


Figura 3.1: Peneiras do tipo padrão segundo a norma da ABNT.

No Brasil, a norma técnica ABNT/NBR 6502/95 (Terminologia - Rochas e Solos) define os seguintes parâmetros, de acordo com a terminologia de rochas e solos mostradas na figura 3.2, relativamente às classificações fornecidas pelas normas ASTM, **American Association of State Highway and Transportation Officials** (AASHPTO), *Massachusetts Institute of Technology* (MIT):

Bloco de rocha - Fragmento de rocha, transportável ou não, com diâmetro superior a 1,0 m.

Matacão – fragmento de rocha, transportado ou não, comumente arredondado por intemperismo ou abrasão, com dimensão compreendida entre 200 mm e 1,0 m.

Pedregulho – solo formado por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0mm e 60,0 mm. Quando arredondados ou semi-arredondados, são denominados cascalhos ou seixos. Divide-se, quanto ao diâmetro, em: pedregulho fino (2 mm a 6 mm), pedregulho médio (6mm a 20 mm) e pedregulho grosso (20 mm a 60 mm).

Areia – solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. A areia classifica-se, por diâmetro, em: areia fina (0,06 mm a 0,2 mm), areia média (0,2 mm a 0,6 mm) e areia grossa (0,6 mm a 2,0 mm).

Argila – solo de granulação fina, constituído por partículas menores de que 0,002 mm.

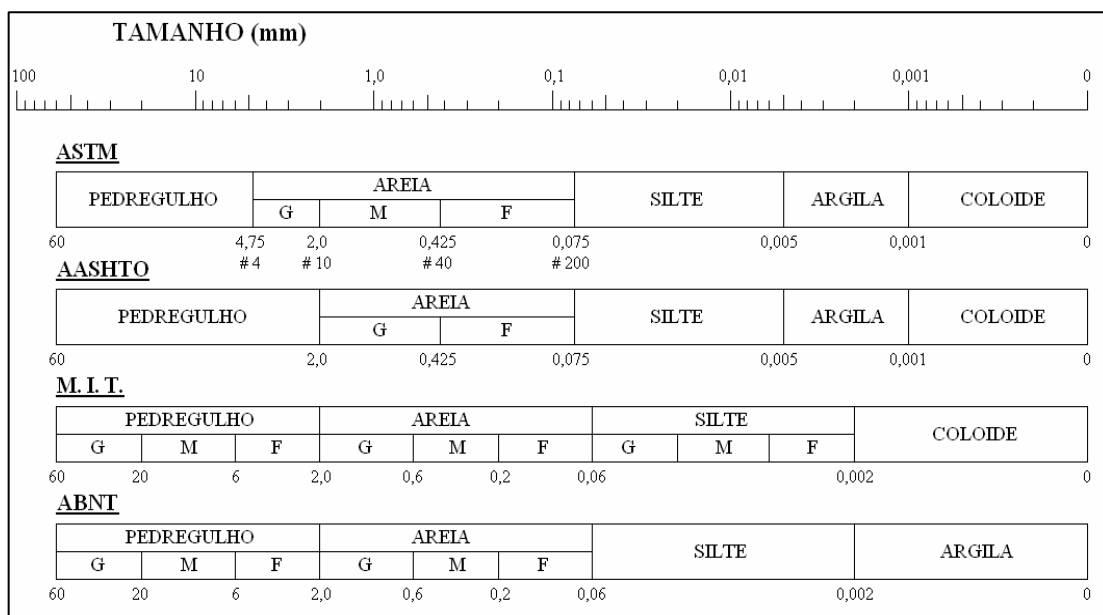


Figura 3.2: Classificação de rochas e solos fornecida pela norma ABNT 6502/95.

Processou-se o peneiramento de 300g dos tipos de materiais Polipropileno (PP) e Poliestireno de alta densidade (PEAD), usaram-se peneiras com as seguintes dimensões: 4,75mm; 2,36mm; 1,18 mm e 6,3mm.

O primeiro material a ser inspecionado foi o do tipo PEAD; com isso, obteve-se 80g (26,6%) de material retido na peneira de 4,75mm e 220g (73,3%), na peneira de 2,36mm; 300g (100%), na de 1,18mm; e zero, na de 6,3mm. O PP teve como resposta de material retido: zero, para as peneiras de 6,3mm e 4,75mm; e 280g (93,3%), na de 2,36mm; e 20g (6,6%), na peneira de 1,18mm.

Para a classificação dos granulados de PET, à semelhança do procedimento para os compósitos do concreto padrão, utilizaram-se as CURVAS GRANULOMÉTRICAS (ABNT-NBR NM 248), mostradas nas figuras 3.3 e 3.4, respectivamente.

Uma vez peneirados os granulados de PET, em termos do compósito de concreto, ambos foram classificados como areia grossa. Então, a substituição será feita relativamente às porcentagens sobre os valores do traço do concreto, em especial, de areia grossa 0,6 mm a 2 mm.

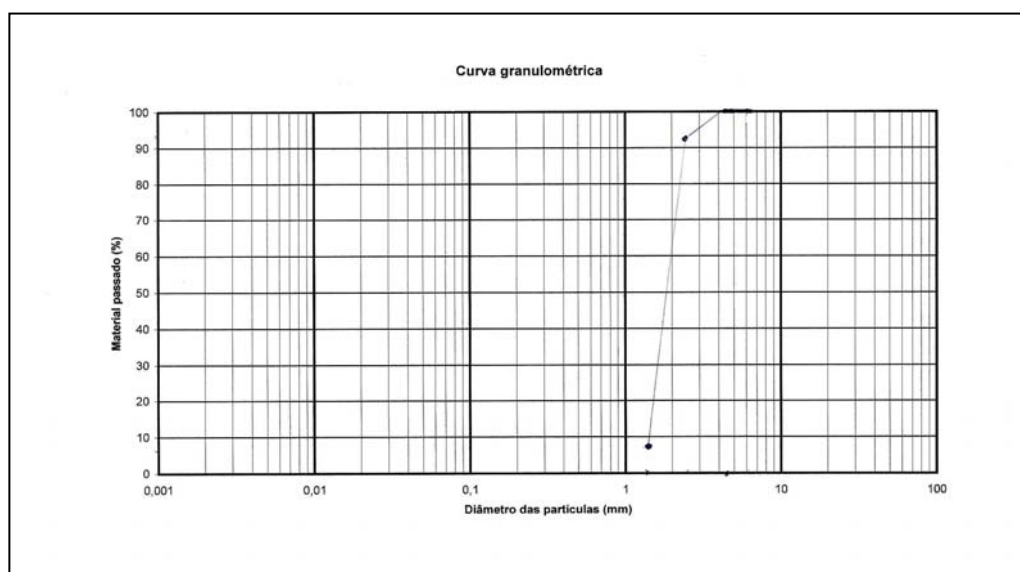


Figura 3.3: Curva granulométrica relativa ao granulado (PP).

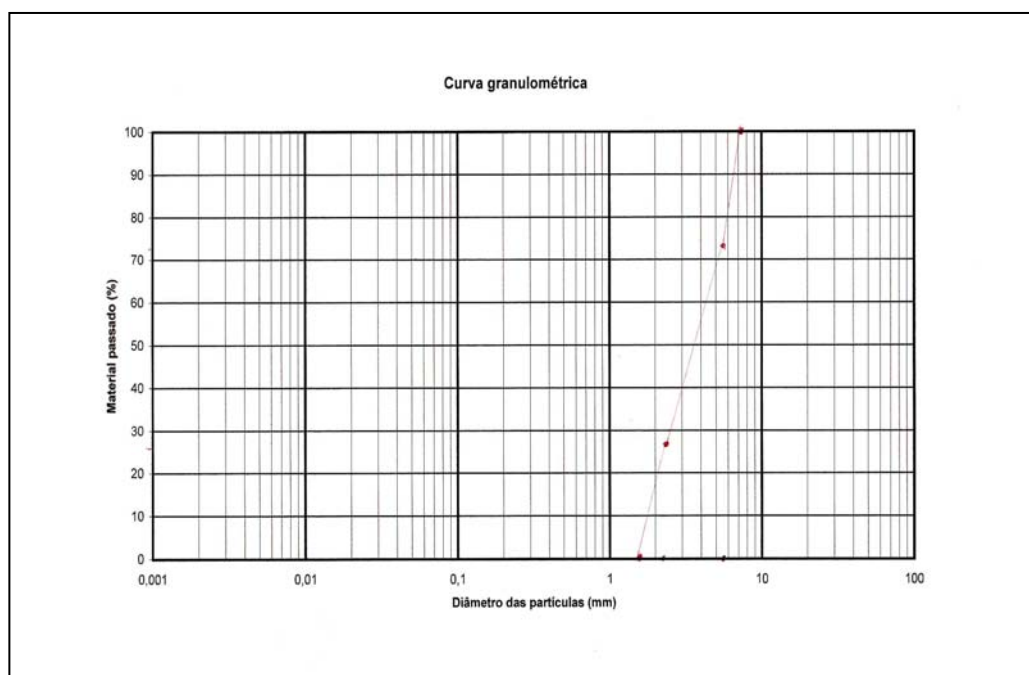


Figura 3.4: Curva granulométrica relativa ao granulado (PEAD).

Os materiais empregados na mistura de concreto foram:

- a) cimento, em unidades de massa (kg ou g);
- b) agregados, em unidades de volume;
- c) correção da água, em função da umidade da areia.

3.3 - Confeção dos Corpos de Prova:

A proporção entre os compósitos constituintes num traço de concreto padrão consiste de cimento 1: areia 2,43: brita 2,43: água 0,49, cuja a dosagem para a produção de 1m³ de concreto é dada na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Dosagem utilizada para 1m³ de concreto.NBR 6118/03

Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Super- plastificante(l)
350	850	850	171,5	4,4

Para se analisar o desempenho dos corpos de prova com a nova mistura, em comparação com corpos de prova de concreto padrão, bem como inspecionar a estrutura interna, em relação às falhas, tais como, microfissuras e vazios decorrentes do próprio batimento do concreto, foram confeccionados corpos de prova de geometria cilíndrica, com 10cm diâmetro e 20 cm de altura, seguindo as normas ABNT-NBR-5738/2003 (moldagem e cura de corpos de prova)

Para cada mistura, foram feitos lotes com 15 corpos de prova. O primeiro lote de corpos de prova foi feito usando o traço para o concreto padrão e suas respectivas densidades. O volume de cada corpo de prova é dado pela expressão πR^2h , resultando em 1,57 dm³, ou seja, 1,57 L. Para se produzir os quinze corpos de prova, foram necessários 23,5 dm³ ou 23,5 L, porém, foram usados 25 L, em virtude das esperadas perdas.

Em 1m³ de concreto, referente ao traço com o cimento CPIII-40, que, em massa, corresponde a 350 kg, de acordo com a norma ABNT-NBR-6474/84, sua densidade física resultou em 2,99 g/cm³ ou 2,99 kg/dm³. Ao se dividir a massa pela densidade, obteve-se a quantidade de cimento em volume (dm³) ou em litros, que resultou em 117,05 dm³ ou 117 L. Para se confeccionar os quinze corpos de prova, considerando-se também as perdas, usou-se 25 L. Foram empregadas 7,8 dm³ ou de 23,3 kg de cimento CPIII-40

O procedimento de se fazer a mistura levando-se em consideração o volume é muito útil, pois, como as densidades dos granulados PP e PEAD são respectivamente 1,4 g/cm³ e 0,9 g/cm³, ao compará-las com a densidade da areia grossa, dada pela norma

ABNT-BNBR 9776 como $2,60 \text{ g/cm}^3$, observa-se que a mistura poderia ficar prejudicada.

Após a separação dos materiais, os compósitos secos foram despejados numa betoneira CS 145, mostrada na figura 3.5. Para o preparo da mistura de concreto misturou-se tudo por 2 minutos; após esse tempo, colocou-se água e misturou-se por mais 5 ou 7 minutos. Em seguida, adicionou-se o plastificante, que ajudou na fluidez do concreto, e misturou-se por mais 12 minutos.

Uma vez batida a massa de concreto, submeteu-se-a ao teste de fluidez (slump test), que mostra o grau de moldabilidade do concreto fresco.



Figura 3.5: Foto da betoneira CS 145.

3.4 - Ensaio de Batimento de Tronco de Cone:

O ensaio de batimento de tronco de cone é bastante usado no cotidiano devido a sua simplicidade de execução. Ele é uma boa ferramenta de controle de qualidade do concreto, pois pode detectar mudanças na composição do concreto distribuído, isto é, se o teor de água foi modificado, a partir da especificação original.

O equipamento utilizado consiste, basicamente, de um tronco de cone metálico aberto em ambas as extremidades (altura de 300 mm, diâmetro inferior de 200 mm e diâmetro superior de 100 mm), que é mantido firmemente apoiado sobre uma placa metálica não-absorvente de 500 mm x 500 mm, por meio do posicionamento do operador sobre os apoios laterais fixados ao molde metálico. Ele é preenchido com concreto, seguindo um procedimento padrão: 1) disposição de massa até um terço do

cone; 2) aplicação de 25 pancadas com o bastão, repetindo até completar; 3) em seguida levantamento vertical, de forma lenta e cuidadosa, durante um intervalo de tempo de aproximadamente 10 segundos. Com isso, o concreto sofre um batimento, o qual é medido. No Brasil, este ensaio é regulamentado pela norma NBR 7223/1982. A figura 3.6 ilustra o teste de batimento de cone (slump test) aplicado às misturas preparadas de concreto.



Figura 3.6: Teste de Batimento de Cone (slump test).

A aplicação do teste de batimento de cone (slump test) resultou em medidas entre 19 e 23 cm e indicou que as misturas de concreto eram aceitáveis.

3.5 - Moldagem dos Corpos de Prova (CPs):

Uma vez concluída essa etapa, pôs-se o concreto nos moldes, seguindo a norma ABNT-NBR 5738/2003, que versa sobre moldagem e cura de corpos de prova, conforme mostra a figura 3.7



Figura 3.7: Formas Cilíndricas Usadas para a Confeção dos Corpos de Prova.

Para acamar a mistura de concreto dentro dos moldes, depositou-se-os sobre uma mesa vibratória, o que também proporciona a retirada das bolhas de ar presentes na mistura. Após essa etapa, os corpos de prova passaram por um tempo de cura, conjunto

de medidas que devem ser tomadas, a fim de se evitar a evaporação da água necessária às reações de hidratação do cimento nas primeiras idades. O tempo de cura usado foi de 28 dias. Todo o procedimento citado anteriormente, usado para a confecção do primeiro lote de 15 corpos de prova de concreto padrão, foi repetido para os outros lotes.

No segundo lote, 15 corpos foram confeccionados com o granulado PP, em substituição à areia grossa, na proporção de 25 %.

Nos terceiro e quarto lotes de corpos de prova, foram usados os granulados de PEAD, em substituição à areia grossa, nas proporções de 25% e 50%, respectivamente.

Os corpos de prova foram submetidos a cargas externas de compressão, segundo a norma ABNT/ NBR 5739/94, referente aos ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Para tal, foram escolhidos aleatoriamente corpos de prova de cada lote para a determinação de suas resistências mecânicas, quando ensaiados numa prensa hidráulica SHIMADZU UH-F1000 KN, mostrada na figura 3.8. Determinou-se a resistência relativamente à Resistência à Compressão Característica (f_{ck}), definida como o valor de resistência acima do qual se espera ter 95% de todos os resultados possíveis de ensaio. A prensa está calibrada em Quilo-Newtons (kN).



Figura 3.8: Prensa SHIMADZU UH F 1000 Usada para Submeter os Corpos de Prova a Diferentes Compressões.

O primeiro lote ensaiado na prensa foi o da mistura que usa o granulado PP a 25%, em substituição à areia grossa. Os três primeiros corpos de prova do PP foram então, levados à prensa e expostos à compressão máxima, até suas rupturas. O primeiro corpo de prova rompeu-se no valor de 265 kN; o segundo corpo de prova chegou ao valor de 253 kN; e o terceiro alcançou o valor máximo em 261 kN. Considerou-se a média dessas três medidas, 259,66 kN, para ensaiar a 60% da compressão máxima mais três corpos de prova, e a 80% desse valor, para ensaiar outros três.

O segundo lote de três corpos de prova foi ensaiado na prensa até 60 % de 361 kN, que equivale a 217 kN.

O terceiro lote de corpos de prova foi comprimido a 80 % do valor máximo médio, ou seja, 155,79 kN.

Sendo a pressão definida como a força aplicada por unidade de área (F/A), no sistema de unidade MKS, ela será expressa em Pascal (Pa), onde 1 Pa corresponde a 1 newton por metro quadrado, então, a pressão máxima aplicada foi de 46 MPa; a de 80% corresponderá ao valor de 36,8 MPa e a 60%, 27,6 MPa. Concluiu-se que o concreto especial pode ser classificado como concreto de estrutura, o qual deve possuir uma resistência acima de 20 MPa.

3.6 - Corte dos Corpos de Prova:

Após os ensaios de compressão, os corpos de prova foram serrados com uma serra elétrica, mostrada na figura 3.9, para que, de cada corpo de prova, fosse retirada uma fatia ou “bolacha” da parte central do cilindro, conforme mostra a figura 3.10.

Após a obtenção das fatias, elas foram lixadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geologia/UFRJ, para se remover as trincas superficiais decorrentes do corte e as rugosidades, que poderiam prejudicar a avaliação das microfissuras decorrentes da aplicação de carga sobre os corpos de prova ou do próprio processo de cura do concreto.



Figura 3.9: Foto da serra elétrica usada para o corte dos blocos cilíndricos de concreto especial.



Figura 3.10: Fatias extraídas das partes centrais dos corpos de prova cilíndricos de concreto.

3.7 - Ensaios de Compressão e Elasticidade:

As principais propriedades mecânicas do concreto são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios executados em condições específicas; geralmente, os ensaios são realizados para controle da qualidade e atendimento às especificações.

No tocante ao módulo da elasticidade (E), ela foi calculada pela razão: $E = \delta / \xi$, onde δ é tensão sobre o corpo de prova e ξ é a deformação específica do corpo de prova. Sabe-se da teoria de Resistência dos Materiais que a relação entre tensão e deformação, para determinados intervalos, pode ser considerada linear (Lei de Hooke). Porém, esse método é aplicado na parte linear da curva o que, para o presente caso, não é apropriado. Quando não existe uma relação linear, a expressão é aplicada para a reta tangente da curva à origem. O módulo de deformação tangente é obtido segundo ensaio descrito na NBR 8522, “Concreto-determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação”. Dessa forma, é obtido o Módulo de Deformação Tangente Inicial E . No presente trabalho, usar-se-á a forma secante para o cálculo do módulo de elasticidade. O Módulo de Elasticidade Secante, E , a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve ser calculado pela expressão:

$$E = \delta_{40\%} / \xi_1 \quad (3.1)$$

Onde:

$\delta_{40\%}$ - tensão sobre o corpo de prova a 40 % da carga máxima de compressão

E - o módulo secante de elasticidade

δ - tensão sobre o corpo de prova

ξ - deformação do corpo de prova.

ξ_0 - deformação inicial do corpo de prova

Para os ensaios de compressão, foi observada a norma ABNT-5739, que dispõe sobre os procedimentos a cerca dos ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos, gerando-se as curvas de compressão em função tempo, que serão apresentadas mais a frente.

3.8 - Arranjo Neutronográfico do Reator Nuclear Argonauta:

O reator Argonauta (figura 3.11) foi o primeiro reator construído no Brasil por empresa nacional, operando no IEN/ CNEN-RJ. Entrou em funcionamento pela primeira vez em 1965. Este é um reator de pesquisa tipo piscina com potência máxima de 5 KW. Atualmente, a potência de operação é de 340 W. O reator Argonauta destina-se ao treinamento e à pesquisa em física de reatores e tecnologia nuclear. O reator possui coeficiente de reatividade negativo, é considerado inerentemente seguro. O núcleo é formado por dois cilindros concêntricos, onde são colocados os elementos combustíveis, com grafite nas partes central e externa, constituindo os refletores externo e interno. No refletor interno existem canais que possibilitam a realização de experiências. A água para moderação e refrigeração do reator é bombeada para dentro do núcleo do reator, enchendo o anel onde estão os elementos combustíveis. Ele possui, na coluna térmica, diversos canais de irradiação sendo o fluxo de $4,5 \times 10^5 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ no canal J-9 central, fornecendo uma razão de nêutron/gama (n/γ) de $3 \times 10^6 \text{ n.cm}^{-2} \text{mR}^{-1}$ e uma razão L/D de 70. (FERREIRA, F.O., 2003).



Figura 3.11: Arranjo neutronografico do reator Argonauta – IEN/CNEN

Um moderador de grafita com 29 cm de espessura foi acoplado ao colimador divergente de grafita, que possui em suas bordas, junto à saída, um revestimento de cádmio, para se obter um bom alinhamento do fluxo de nêutrons. Junto ao canal ainda se usa um aparato para blindagem das radiações, constituído de blocos de parafina borada e chumbo, como mostra a figura 3.12.

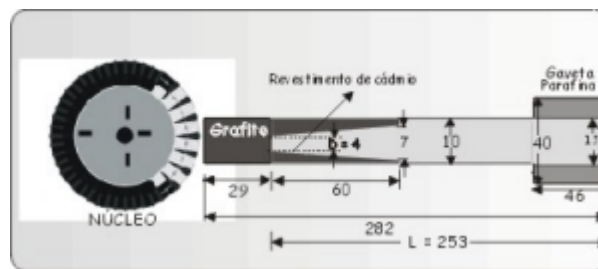


Figura 3.12: Desenho esquemático do arranjo neutrôngráfico instalado no canal J-9 do reator Argonauta.

A figura 3.13 mostra o espectro de nêutrons emergentes do canal de irradiação J-9 do reator Argonauta, aproximadamente Maxwelliano, onde se observa que o valor mais provável da energia dos nêutrons é de 30 meV (VOI, 1990).

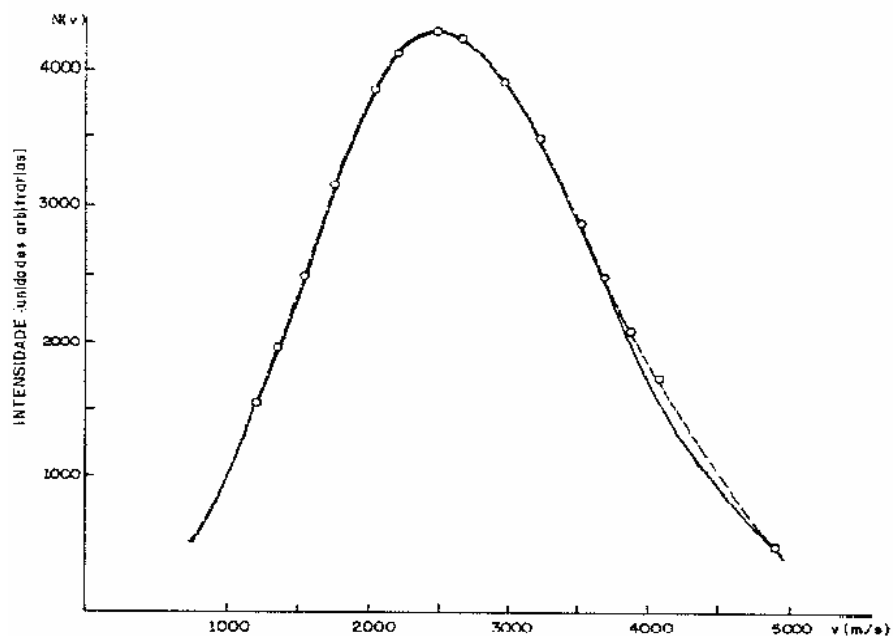


Figura 3.13: Espectro medido de nêutrons térmicos na saída do canal J-9 do reator

Após a montagem do chassi, posicionou-se-o frontalmente ao feixe de nêutrons provindo do canal J-9. A figura 3.14 mostra os 14 canais de irradiação localizados na coluna térmica do reator Argonauta, sendo o J-9 o mais central.



Figura 3.14: Canais de irradiação localizados na coluna térmica do reator Argonauta, tendo no centro o canal J-9.

3.9 - Qualidade da imagem digital

A qualidade de uma imagem digital está relacionada aos seguintes parâmetros: resolução, contraste e nitidez.

A resolução espacial é um dos principais parâmetros que afetam a qualidade da imagem, sendo definida como a menor separação (distância) entre dois pontos da imagem que podem ser distinguidos ou visualizados; a resolução é dada pela largura a meia altura (FWHM) da função ESF diferenciada, ajustada a uma distribuição de Lorentz a equação 3.1 (FERREIRA, F. J. O., 2003).

O contraste é o grau de diferenciação em tons de cinza entre duas estruturas adjacentes. Quanto maior for o contraste, mais visíveis serão as interfaces e as estruturas inspecionadas do objeto.

A nitidez da imagem está associada ao grau de visualização de detalhes na imagem, sendo demonstrada pela melhor visibilidade das linhas estruturais mais finas e das bordas estruturais.

3.10 - Função de borda difusa (ESF):

Uma das formas de se avaliar a resolução do sistema de imagem é através do ajuste de uma função à distribuição de níveis de cinza na borda entre a imagem de um objeto descrito no item 3.1.

A função de borda difusa, *Edge Spread Function* - ESF, pode ser expressa por:

$$ESF = A + B \arctang (Cx + D) \quad (3.2)$$

onde: A, B, C e D são parâmetros a serem ajustados e x é a coordenada obtida através da distribuição espacial de níveis de cinza. Após o ajuste da curva aos níveis de cinza obtidos experimentalmente, a inclinação da reta que é expressa por C fornece a resolução total (R_T) (MENEZES, 2000), com uma boa aproximação, por:

$$R_T = C / 2 \quad (3.3)$$

3.11 - Função de Modulação de Transferência (MTF):

Outro parâmetro capaz de definir a qualidade da imagem é a Função Transferência de Modulação (sigla em inglês: *Modulation Transfer Function* - MTF). A MTF avalia a eficiência do sistema neutrongráfico e quanto maior for o valor da MTF, melhor é a visualização da imagem de pequenos defeitos.

A MTF, para um sistema de imageamento, é definida como a razão entre o contraste registrado e o contraste ideal esperado. É uma representação gráfica da habilidade do sistema para reproduzir a frequência de varredura espacial presente na imagem.

Diferentemente da resolução, que representa uma função discreta da frequência espacial, a MTF é uma função contínua, que fornece mais informações em torno das limitações e desempenho do sistema. A MTF possui duas características importantes:

- O resultado independe do observador

- A MTF total de um sistema com vários componentes é obtida multiplicando-se as MTF individuais, sendo as mesmas lineares e as suas MTF sejam independentes na sua determinação. A modulação do sinal de resposta de um sistema de imageamento é um fator fundamental na verificação da resolução espacial do sistema. (MENEZES, 2000).

Experimentalmente, determinou-se a modulação do sinal usando um indicador de resolução visual (IRV), que é uma placa de Cádmiu, material altamente absorvedor

de nêutrons, com pequenos orifícios de 1 mm de diâmetro, 0,5 mm diâmetro de 0,25 mm diâmetro. Primeiramente fez-se uma neutrongrafia desse IRVe digitalizou-se a mesma onde se verifica três linhas, ou seja, três frequências distintas (fig.2.16).

Como a MTF é definida como a resposta do sistema de imagem através da frequência espacial ou de varredura, que é medida em linha por milímetro (l /mm), então nesta imagem observa-se três diferentes frequências: a de uma linha por milímetro, a de duas linhas por milímetro e de quatro linhas por milímetro, onde realizamos as varreduras, e nas três diferentes frequências obtemos os valores para o número de cinza máximo $NC_{máx}$ e o número de cinza médio $NC_{méd}$ além da modulação (M) que é definida pela expressão

$$M = NC_{máx} - NC_{méd} / NC_{méd} \quad (3.4)$$

3.12 - Emprego de Agente Contrastante nos Ensaios Neutronográficos:

Para se ter uma melhor qualidade de imagem neutronográfica e, conseqüentemente, uma melhor visualização de possíveis microfissuras ou de descontinuidades, que, eventualmente, podem se unir formando falhas macroscópicas no concreto, imergiu-se as amostras polidas de concreto (ADERHOLD H.C.) numa solução aquosa de $Gd(NO_3)_2$, usado como agente de contraste. Os materiais empregados como agentes contrastantes em Neutronografia podem ser desde a água até compostos mais elaborados, sendo capazes de melhorar a visualização das microfissuras e vazios no concreto, por possuírem uma alta seção de choque de absorção σ_a , ou espalhamento σ_s , para nêutrons térmicos, σ_a . O gadolínio (Gd) natural é composto dos elementos ^{155}Gd (abundância natural relativa de 14,73 %), e ^{157}Gd (abundância natural relativa de 15,68 %) que apresentam os maiores valores de σ_a , a saber: 61000 barns e 240000 barns, respectivamente, dentre os materiais mais utilizados como agentes contrastantes (BRENIZER, J.S.).

Após serem completadas as etapas de confecção, compressão e corte dos corpos de prova, foram selecionadas, aleatoriamente, três fatias polidas de concreto especial, confeccionadas com o material PP a 25%. Cada pastilha usada nessa etapa foi

escolhida dentro de um mesmo grupo de corpos de prova que foram submetidos à mesma carga de compressão: uma com 100 % de carga (ruptura) e as outras duas a 80% e 60%, respectivamente, da carga total suportada pelos mesmos.

Como o tipo de inspeção desejada inclui a visualização de microfissuras e vazios provenientes até da cura do concreto, utilizou-se o nitrato de gadolínio $Gd(NO_3)_2$ como agente contrastante para a Neutrongrafia,. Após a imersão das fatias no $Gd(NO_3)_2$, elas foram deixadas secar naturalmente por um tempo superior a 8 horas. Após a secagem, as fatias polidas de concreto foram presas ao chassi radiográfico de alumínio, pré-alimentado com uma folha do filme KODAK INDUSTREX M e uma folha conversora de gadolínio com 50 μm de espessura. Fixou-se, sobre cada pastilha de concreto, uma blindagem de chumbo com 1 mm de espessura para filtrar os raios γ inerentes ao feixe neutrônico, para se reduzir o ruído na imagem neutrongráfica.

Com base na curva característica do sistema filme-conversor empregado, especificados no item 3.8, utilizou-se o método direto para a obtenção de cada Neutrongrafia e 60 minutos de tempo de exposição, de acordo com a curva característica disponibilizada por Crispim (CRISPIM, V. R., 1993). Passado o tempo de exposição, o chassi foi retirado e conduzido a uma câmara escura, para o processamento de revelação e fixação da imagem registrada no filme radiográfico, seguindo os passos citados no item.2.9.

Com as chapas reveladas, obteve-se as imagens neutrongráficas digitalizadas, utilizando-se o scanner ArtixScan F1 MICROTEK disponível no Laboratório de Neutrongrafia em Tempo Real/PEN/COPPE/UFRJ.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 - Ensaios de Compressão Sobre os Corpos de Prova:

Primeiramente, procedeu-se ao levantamento das curvas de compressão, em unidades de KN, em função do tempo (s), referentes às misturas, tanto dos concretos especiais que utilizam granulados PP a 25%, em substituição da areia grossa, e os que utilizam o granulado PEAD a 25% e 50%, quanto do concreto de referência, da forma como se descreveu no item 3.2. Com esses dados, obteve-se o módulo de elasticidade das misturas especiais e do concreto de referência.

A figura 4.1 mostra o gráfico das tensões relacionadas aos corpos de prova contendo PEAD 25%, PP 25%; PEAD 50% e Concreto de Referência, respectivamente quando submetidos à compressão de 60% de ruptura, em função do tempo.

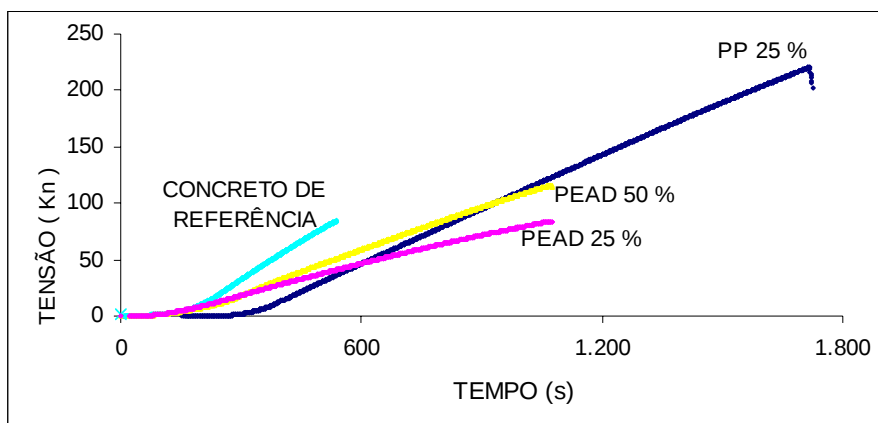


Figura 4.1: Tensão de compressão aplicada aos diferentes corpos de prova sob compressão de 60 % do valor de ruptura, em função do tempo.

A figura 4.2 mostra o gráfico da tensão de compressão sobre os corpos de prova PP 25%, PEAD 25%, PEAD 50% e o concreto de referência, quando submetidos à compressão de 80 % do valor de ruptura, em função do tempo.

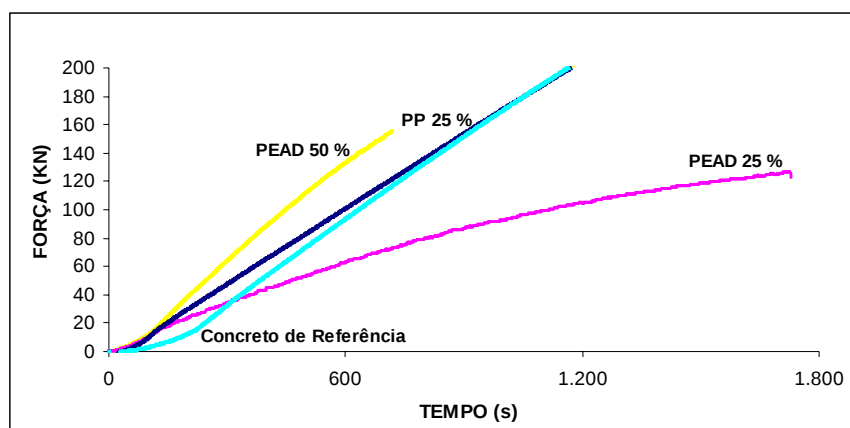


Figura 4.2: Tensão de compressão aplicada aos diferentes corpos de prova sob compressão de 80 % do valor de ruptura.

A figura 4.3 mostra o gráfico da tensão compressão sobre os corpos de prova PEAD 25%, PP 25%, PEAD 50% e o concreto de referência, quando submetidos à compressão de 100 % de ruptura.

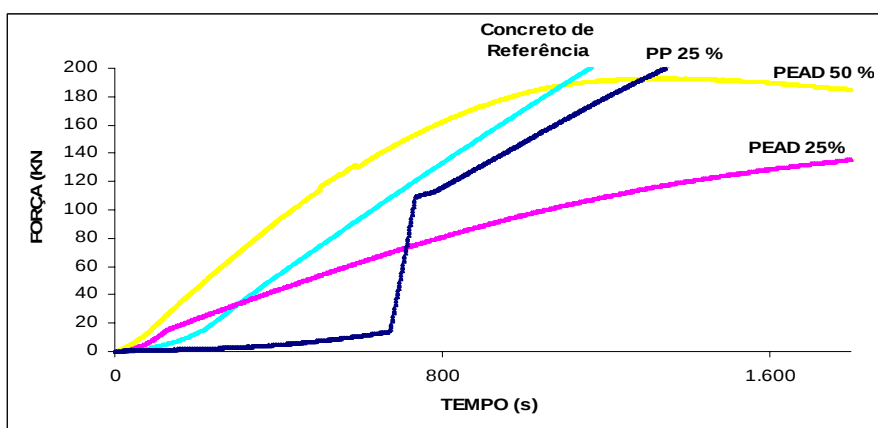


Figura 4.3: Tensão de compressão aplicada aos diferentes corpos de prova sob compressão de 100 % do valor de ruptura.

As figuras 4.4, 4.5 e 4.6, referem-se às resistências à compressão (MPa), deformações ocorridas nos corpos de prova PP 25% , PEAD 25 %, PEAD 50% e o concreto referência, quando submetidos à compressão de 60 % do valor de ruptura.

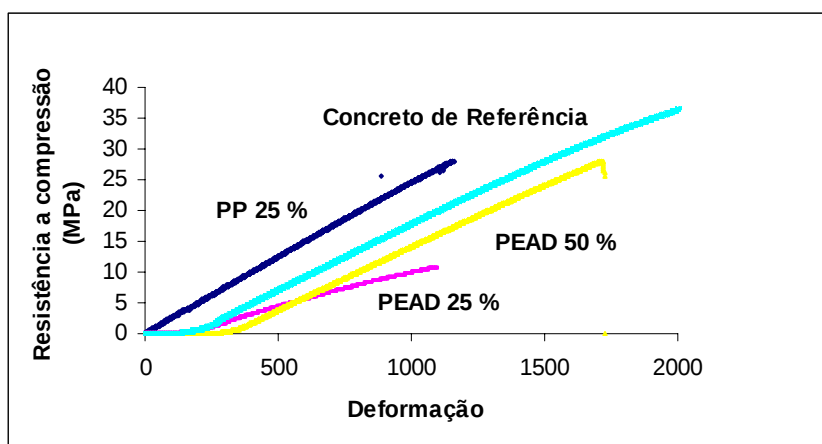


Figura 4.4: Resistência à compressão em função das deformações nos corpos de prova, quando submetidos à compressão de 60% do valor de ruptura

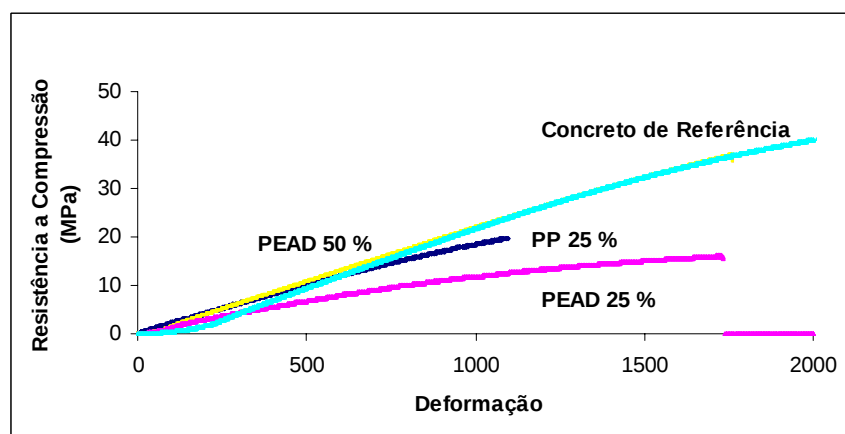


Figura 4.5: Resistência à compressão, em função das deformações nos corpos de prova, quando submetidos à compressão de 80% do valor de ruptura.

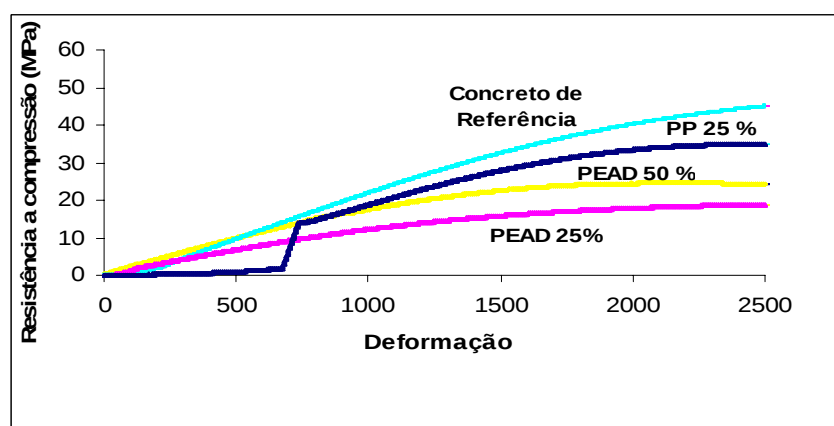


Figura 4.6: Resistência à compressão em função das deformações nos corpos de prova, quando submetidos à compressão de 100% do valor de ruptura.

Para facilitar a análise dos dados obtidos, através dos gráficos mostrados anteriormente, referenciam-se as principais informações, tais como: tempo de compressão(T), módulo de elasticidade (E) e força (kN), dispostos nas tabelas (4.1, 4.2 e 4.3). As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 dispõem esses parâmetros para os ensaios com os corpos de prova: PEAD a 25 %; PP a 25 %; PEAD a 50 % e o Concreto de Referência, após serem submetidos às compressões de 100 %, 80 % e 60%, respectivamente.

Tabela 4.1: Parâmetros relativos à compressão de 100% dos Corpos de Prova (C.P.).

Parâmetros relativos à compressão	25 % de PP	25% de PEAD	50 % de PEAD	Concreto de Referência
Tempo (s)	224,20	244,95	221,50	178,90
Força (kN)	259,33	134,27	170,54	373,24
Elasticidade	18,08	6,14	9,65	21,33

Tabela 4.2: Parâmetros relativos à compressão de 80% dos Corpos de Prova (C.P.).

Parâmetros relativos à compressão	25 % de PP	25 % de PEAD	50 % de PEAD	Concreto de Referência
Tempo (s)	1030,00	1047,50	718,00	1580,90
Força (kN)	160,00	126,64	155,10	178,00
Elasticidade	16,55	5,36	10,01	10,33

Tabela 4.3: Parâmetros relativos à compressão de 60 % dos corpos de prova (C.P.).

Parâmetros relativos à compressão	25% de PP	25% de PEAD	50% de PEAD	Concreto de Referência
Tempo (s)	873,00	536 50	536,50	1580,90
Força (kN)	135,00	83,57	115,14	178,00
Elasticidade	18,33	1,79	6,22	10,33

Em função do aumento da tensão de compressão aplicada, para cada percentual de granulado empregado em cada corpo de prova e para cada tipo de granulado, é

esperado que o número de microfissuras cresça e, além disso, que suas larguras também resultem maiores. A ausência de observação desses eventos pode indicar, por exemplo, se a elasticidade do concreto especial com granulados de PP ou PEAD é maior ou menor do que a do Concreto de Referência. Portanto, a avaliação da imagem neutrongráfica referente a cada fatia do corpo de prova, relacionada a cada condição de ensaio realizado, é de suma importância para o levantamento das características do concreto especial com granulados de PP e PEAD, relativamente à do Concreto de Referência.

4.2 - Sistema Neutrongráfico Experimental:

A figura 4.7 mostra a Neutrongrafia do IRV, onde se observa, em destaque a interface entre a placa de cádmio e a região relacionada à incidência direta do feixe neutrônico (maior nível de cinza). Nessa interface, fez-se uma varredura numa extensão de 3,0 mm. Após o processamento da imagem neutrongráfica do IRV, obtendo a distribuição de níveis de cinza ao longo dessa região.

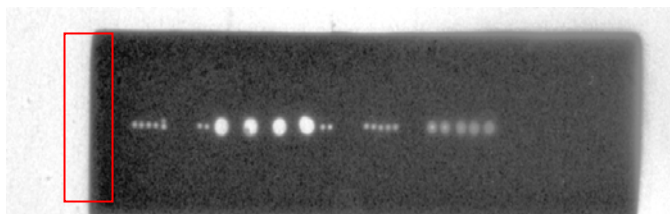


Figura 4.7 : Neutrongrafia do Indicador de Resolução Visual.

A figura 4.8 mostra os pontos experimentais e a curva que melhor se ajustou aos níveis de cinza medidos.

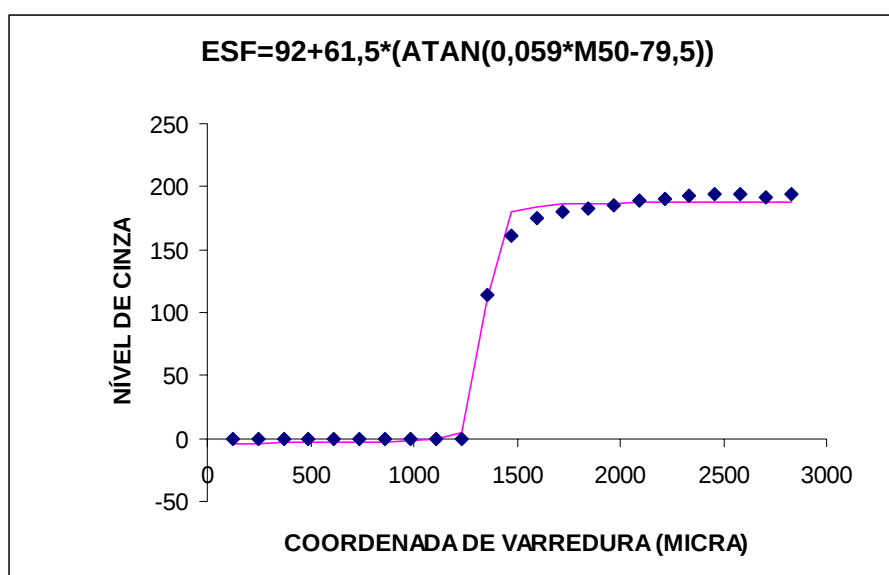


Figura 4.8: ESF ajustada aos pontos experimentais

Conforme descrito no item 3.10 a resolução total do sistema é dada por $C/2$, equação 3.3, então o valor encontrado para o arranjo neutrongráfico foi 30 micra. . Portanto, o sistema neutrongráfico demonstra ser capaz de distinguir larguras de microfissuras acima desse valor.

Experimentalmente, determinou-se a modulação do sinal usando também o indicador de resolução visual (IRV), cuja imagem neutrongráfica está apresentada na figura 4.7, onde observamos as três frequências espaciais distintas (1 linha/mm, 2 linhas/mm e 4 linhas/mm).

A tabela 4.4 apresenta os valores de modulação do sinal obtidos neste processo de medida através da equação 3.4, sendo primeiramente avaliado o de menor frequência e assim sucessivamente.

Tabela 4.4: Valores de modulação do sinal calculados para o sistema neutrongráfico

Arranjo Neutrongráfico	Frequência Espacial	NC _{máx}	NC _{méd}	M %
Reator Argonauta IEN	1	231	143	61
	2	160	112	42
	4	157	113	38

Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado, pois esses valores diminuem com o aumento da frequência.

4.3 - Largura das Microfissuras após Compressão dos Corpos:

As Neutronografias relativas às fatias dos corpos de prova confeccionados com percentuais de 25 % e 50 % de PP e PEAD e com o concreto de referência foram digitalizadas de acordo com o método discutido no item 2.10. As imagens correspondentes encontram-se dispostas nas figuras 4.8 à 4.19. As imagens foram processadas através do programa Image Pro-Plus, de forma a se medir as larguras das microfissuras.

Primeiramente, escolheram-se as duas fissuras mais visível em cada imagem neutronográfica. Depois, realizaram-se cinco medidas de suas respectivas larguras, ao longo de cada microfissura. Além disso, outros dados foram levantados, tais como: largura das microfissuras em cada posição; menor e maior largura, largura média; e desvio padrão associado, cujos valores encontram-se listados nas tabelas dispostas no quadro à direita da imagem. Em cada uma das figuras destacou-se uma das microfissuras, de forma a ilustrar o procedimento descrito anteriormente.

4.3.1 - Compressão a 60 % do Valor de Ruptura

Os primeiros parâmetros de mérito a se analisar nas Neutronografias realizadas referem-se às larguras das microfissuras originadas nos corpos de prova contendo granulados de PEAD, na proporção de 25 %, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 60% do valor de ruptura. Pelas imagens neutronográficas observadas nas figuras 4.8 e A.1(Apêndice A), obteve-se os valores das larguras das microfissuras no interior de duas microfissuras, efetuando-se cinco medidas em cada uma delas. Os valores mínimos e máximos das larguras ao longo das microfissuras selecionadas, vistos na tabela agregada à figura 4.8, foram 340 μm e 472 μm , respectivamente, demonstrando uma variação relativa de 28 % ao longo de sua extensão. Com relação às medidas relacionadas à figura A.1, obteve-se os valores mínimo e máximo de largura da microfissura de 283 μm e 340 μm , respectivamente, mostrando uma variação relativa de 17 %, menor do que a do caso anterior.

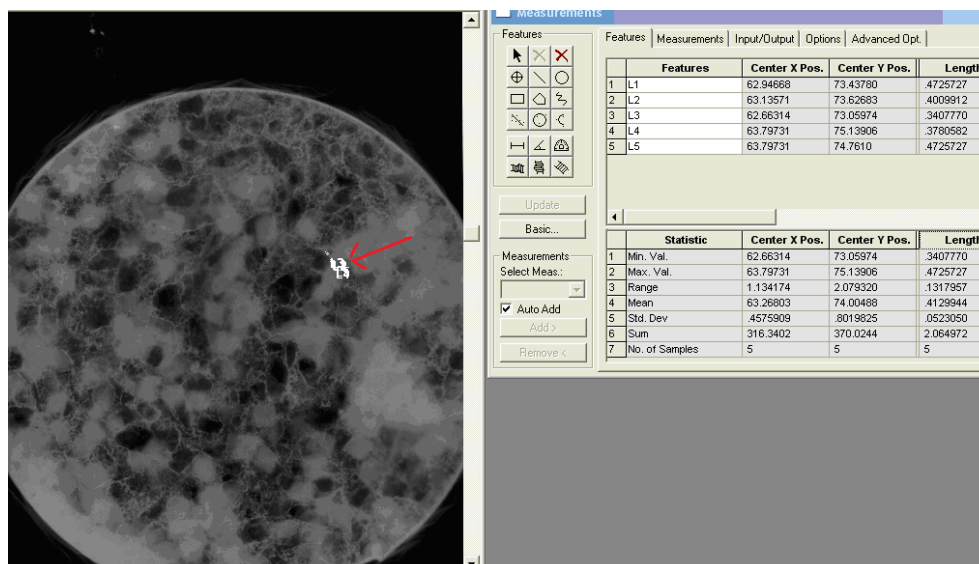


Figura 4.8: Imagem neutrográfica do C P com 25 % de PEAD, após compressão de 60 % do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.8 (a) mostra a imagem neutrográfica do corpo de prova que contém granulados de PEAD, na proporção de 25 %, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 60% do seu valor de ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissuras, sendo estas medidas divididas igualmente em duas áreas distintas nesse corpo de prova.

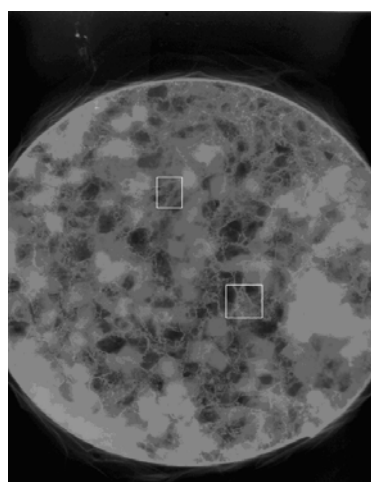


Figura 4.8 (a): Imagem neutrográfica do C P com 25% de PEAD, após compressão de 60 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.8 (b) mostra em detalhe a área superior esquerda, discriminada na figura 4.10 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

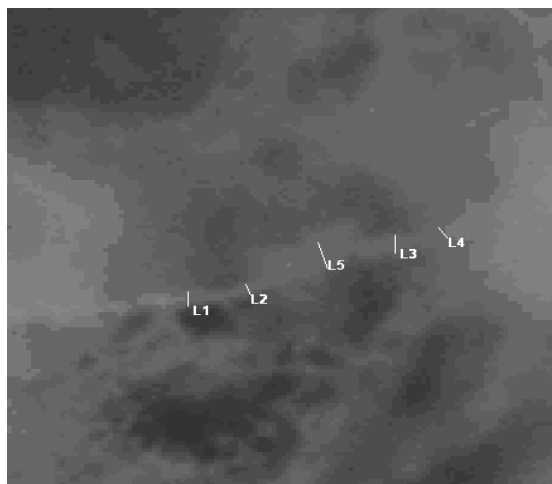


Figura 4.8 (b): Imagem ampliada da área superior esquerda, discriminada na fig.4.8 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.5 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.8 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição; menor e maior largura, largura média; e desvio padrão associado.

Tabela 4.5 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.8 (b)

Medidas	Largura (μm)
L ₁	378
L ₂	296
L ₃	472
L ₄	340
L ₅	688
Val. Mínimo	296
Val. Máximo	688
Val. Médio	435
Desv. Padrão	138

Analisando a tabela 4.5 (a), observa-se que os valores da largura mínima e máxima das microfissuras são de 296 μm e 688 μm , respectivamente, resultando em uma variação relativa de 56 %.

A figura 4.8 (c), mostra em detalhe, a área inferior direita, discriminada na figura 4.8 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

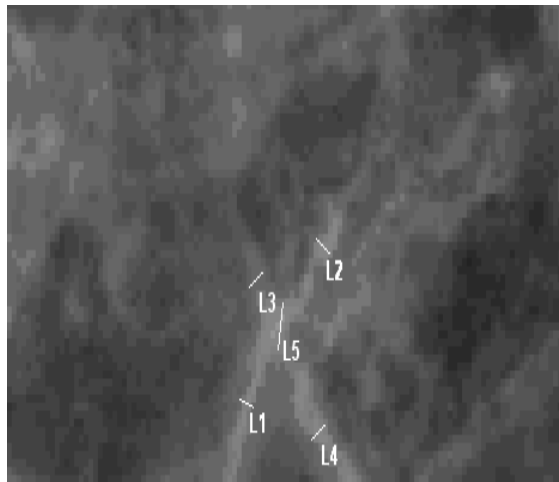


Figura 4.8 (c): Imagem ampliada da área inferior direita, discriminada na fig.4.8 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.5 (b) mostra os valores das medidas das que foram levantadas na figura 4.8 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.5 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.8 (c)

Medidas	Largura (μm)
L ₁	389
L ₂	389
L ₃	481
L ₄	452
L ₅	801
Val. Mínimo	389
Val. Máximo	801
Val. Médio	502
Desv. Padrão	239

Nesta tabela obteve-se uma variação relativa de 51%, quando analisada a relação do valor mínimo de 389 μm e o valor máximo de 801 μm para as larguras das microfissuras. Há neste corpo sete microfissuras visíveis.

O segundo corpo de prova a ser analisado continha na mistura 25 % de granulado PP, proporcionalmente usado em detrimento à areia grossa. Primeiramente, considerou-se os valores das larguras das duas microfissuras, assinaladas nas figuras 4.9 e A.2, feitas em cinco posições diferentes ao longo delas, quando o corpo de prova foi submetido à compressão a 60 % do valor de ruptura. Em relação ao corpo de prova com 25 % de PP, ocorreu uma variação relativa nas larguras das microfissuras, de cerca de 21 %, de acordo com valores listados na tabela agregada na figura 4.9: respectivamente, 267 μm e 340 μm , com valor médio de 285 μm e desvio padrão de 28 μm . Comportamento semelhante ocorre para as microfissuras assinaladas na figura A.2, sendo 211 μm e 267 μm , seus valores mínimo e máximo, respectivamente, correspondendo ao valor médio de 259 μm e ao desvio de 24 μm . Existem 11 microfissuras visíveis neste corpo

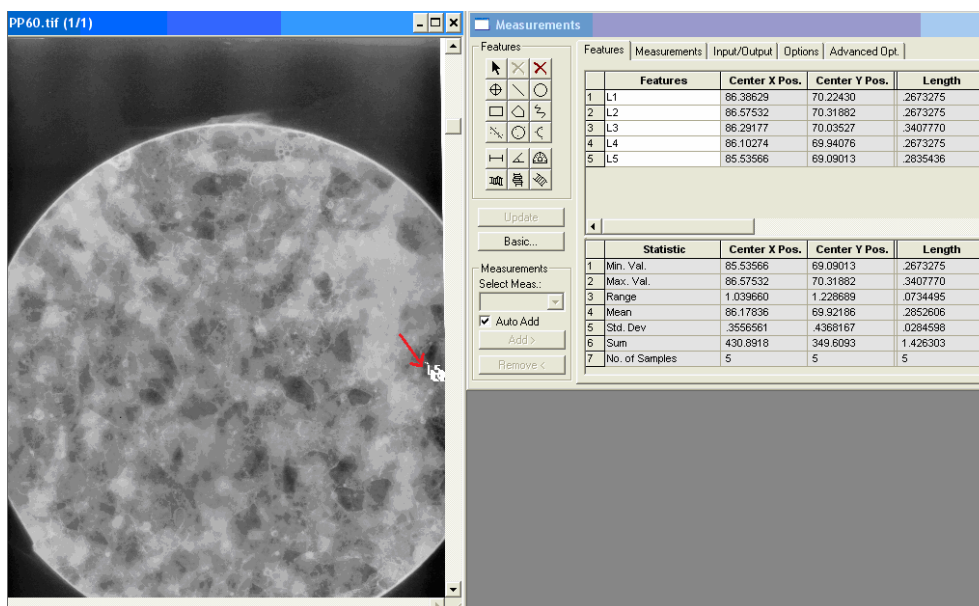


Figura 4.9: Imagem neutrongráfica do C P com 25 % de PP, após compressão de 60 % do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.9 (a) mostra a imagem neutrongráfica do corpo de prova que contem granulados de PP, na proporção de 25 % em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 60% do seu valor de

ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissuras concorrentes, sendo estas medidas divididas igualmente em duas áreas distintas nesse corpo de prova.

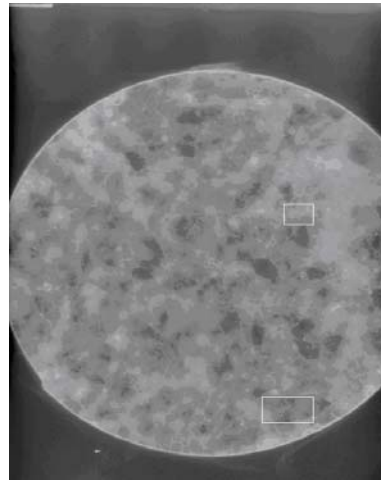


Figura 4.9 (a): Imagem neutronográfica do C P com 25% de PP, após compressão de 60 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas

A figura 4.9 (b) mostra em detalhe a área inferior, discriminada na figura 4.9 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

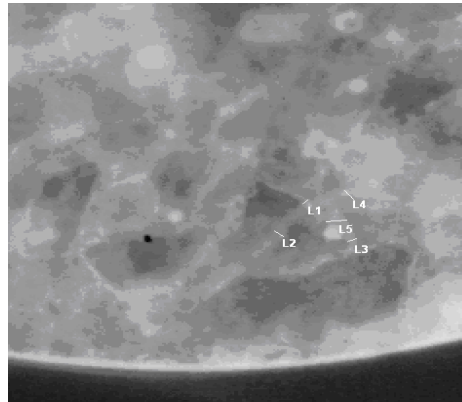


Figura 4.9 (b): Imagem ampliada da área inferior, discriminada na fig.4.9 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.6 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.9 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.6 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.9 (b):

Medidas	Largura (μm)
L ₁	400
L ₂	605
L ₃	508
L ₄	738
L ₅	1043
Val. Mínimo	400
Val. Máximo	1043
Val. Médio	659
Desv. Padrão	222

Com relação à tabela 4.6 (a), verificou-se uma variação relativa de 61 %, quando comparamos os valores mínimo e máximo, que são 400 μm e 1043 μm , respectivamente.

A figura 4.9 (c) mostra em detalhe, a área superior assinalada na figura 4.9 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

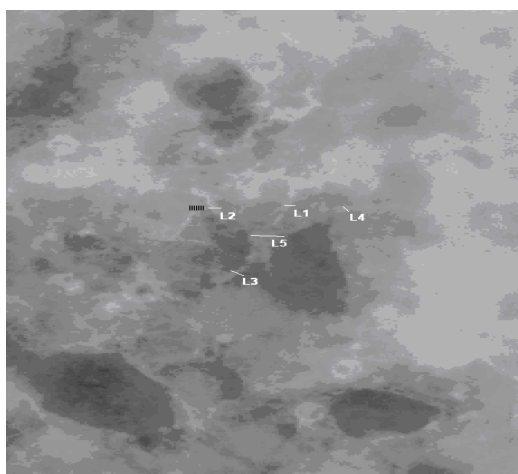


Figura 4.9 (c): Imagem ampliada da área superior, discriminada na fig.4.9 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.6 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.9 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.6 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.9 (c)

Medidas	Largura (μm)
L ₁	472
L ₂	567
L ₃	681
L ₄	472
L ₅	1.420
Val. Mínimo	472
Val. Máximo	1420
Val. Médio	722
Desv. Padrão	357

Para os valores das larguras microfissuras, constantes na tabela 4.6 (b), a variação relativa é de 67 %, na comparação dos valores mínimo e máximo que são 472 μm e 1420 μm , respectivamente. Há 11 microfissuras visíveis neste corpo.

Com relação à mistura de concreto especial contendo 50% de granulados PEAD, quando os corpos de prova foram submetidos à compressão de 60% do seu valor de ruptura, procedimento análogo foi seguido, com base nas figuras 4.10 e A.3 e nos valores das larguras das microfissuras, das figuras 4.10 (a), (b),e (c).

Analisando a tabela agregada na figura 4.10, observa-se que a largura mínima da microfissura foi de 211 μm , sendo a largura máxima de 378 μm e a largura média de 267 μm , com desvio padrão de 53 μm , resultando em uma variação relativa de 44% entre os valores máximo e mínimo. No tocante à figura A.3, ocorreu uma variação de 33% entre as larguras mínima e máxima, das microfissuras, sendo 481 μm e 719 μm , respectivamente, cuja largura média foi de 642 μm , com um desvio padrão de 83 μm . Há 13 microfissuras visíveis nessa amostra.

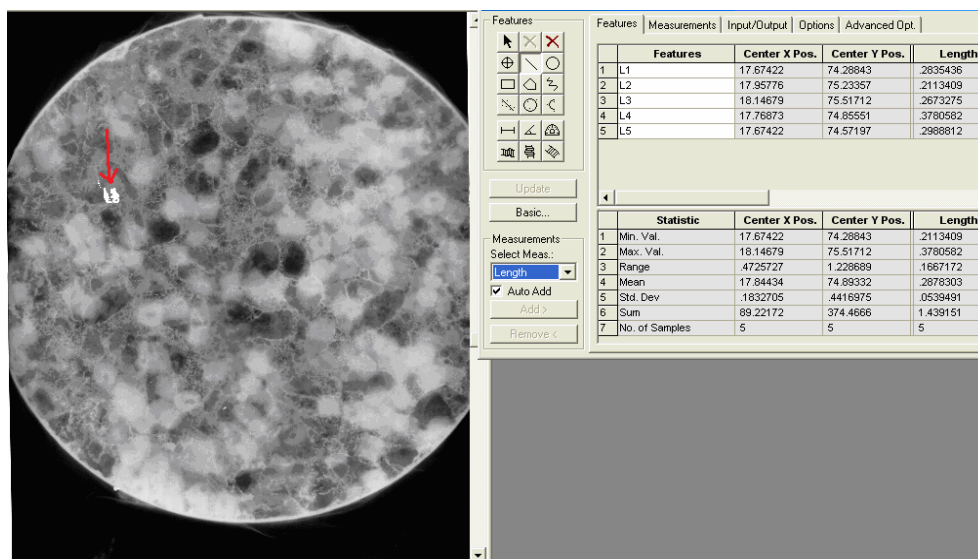


Figura 4.10: Imagem neutrográfica do C P com 50 % de PEAD, após compressão de 60 % do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.10 (a) mostra a imagem neutrográfica do corpo de prova que contem granulados de PEAD, na proporção de 50%, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 60% do seu valor de ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissuras concorrentes, sendo estas medidas, divididas igualmente em duas áreas distintas nesse corpo de prova.

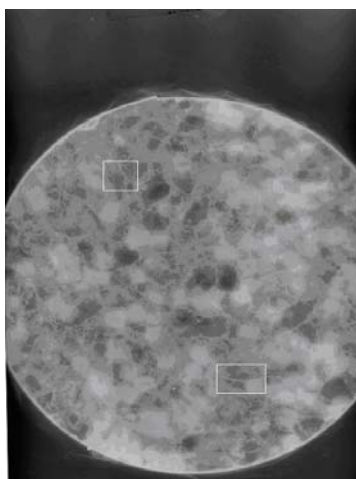


Figura 4.10 (a): Imagem neutrográfica do C P com 50 % de PEAD, após compressão de 60 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.10 (b) mostra em detalhe a área inferior, discriminada na figura 4.10 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

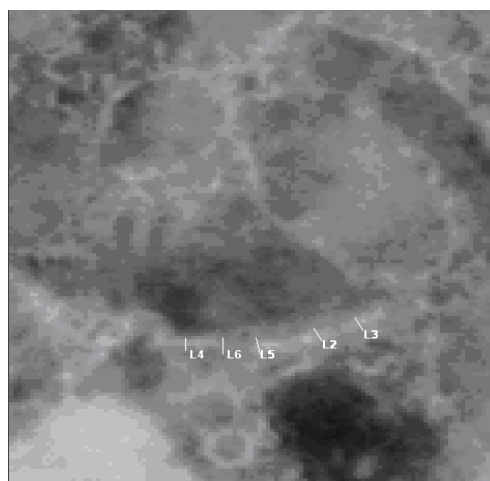


Figura 4.10 (b): Imagem ampliada da área inferior, discriminada na fig.4.10 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas.

A tabela 4.7 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.10 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.7 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.10 (b)

Medidas	Largura (μm)
L ₂	422
L ₃	422
L ₄	378
L ₅	481
L ₆	472
Val. Mínimo	378
Val. Máximo	481
Val. Médio	435
Desv. Padrão	37

Diferentemente dos valores obtidos anteriormente para as larguras das microfissuras, observou-se um valor pequeno na variação relativa que é de 21%, devido

a pouca diferença entre os valores mínimo e máximo que são 378 μm e 481 μm , respectivamente.

A figura 4.10 (c) mostra em detalhe a área superior, discriminada na figura 4.10 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

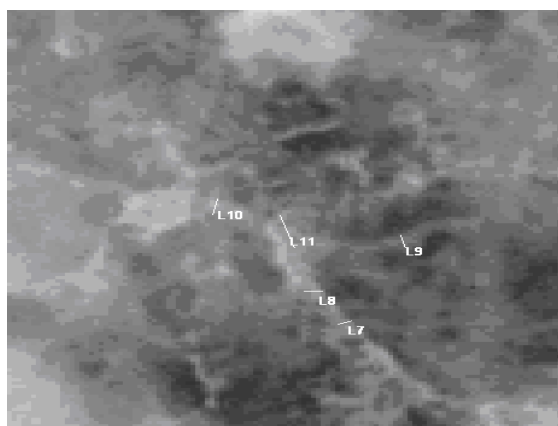


Figura 4.10 (c): Imagem ampliada da área superior , discriminada na fig.4.10 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas Imagem .

A tabela 4.7 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.10 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.7 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.10 (c)

Medidas	Largura (μm)
L ₇	298
L ₈	378
L ₉	389
L ₁₀	481
L ₁₁	986
Val. Mínimo	298
Val. Máximo	986
Val. Médio	507
Desv. Padrão	246

Em função dos valores mínimo e máximo listados na tabela 4.7 (b), que são 298 μm e 986 μm , respectivamente, obteve-se uma variação relativa de 69 %, bem maior que o anterior.

O quarto corpo de prova de prova inspecionado foi o Concreto de Referência, após ser submetido à compressão de 60%. Para análise das microfissuras resultantes desta compressão, as larguras assinaladas nas figuras 4.11 e A.4 e nas figuras 4.11 (a), (b) e (c) e tabelas 4.8 (a) e (b) consideradas.

Para a microfissura assinalada na figura 4.11 obteve-se os valores de largura mínimo e máximo, dentre cinco medidas ao longo de sua extensão, de 291 μm e 551 μm , respectivamente, que correspondem a uma variação de 47 %. Em relação ao valor médio de 406 μm e o desvio padrão de 91 μm , verifica-se uma discrepância quanto ao valor da largura mínima.

No tocante à figura A.4, ao contrário das medidas obtidas na figura 4.11, os valores são bem próximos, com pouca variação nas medidas da largura, que são 298 μm e 340 μm para os valores mínimo e máximo, respectivamente, que resulta numa variação relativa de 12%.

Para esse corpo de prova, foram consideradas as 15 (quinze) microfissuras mais visíveis.

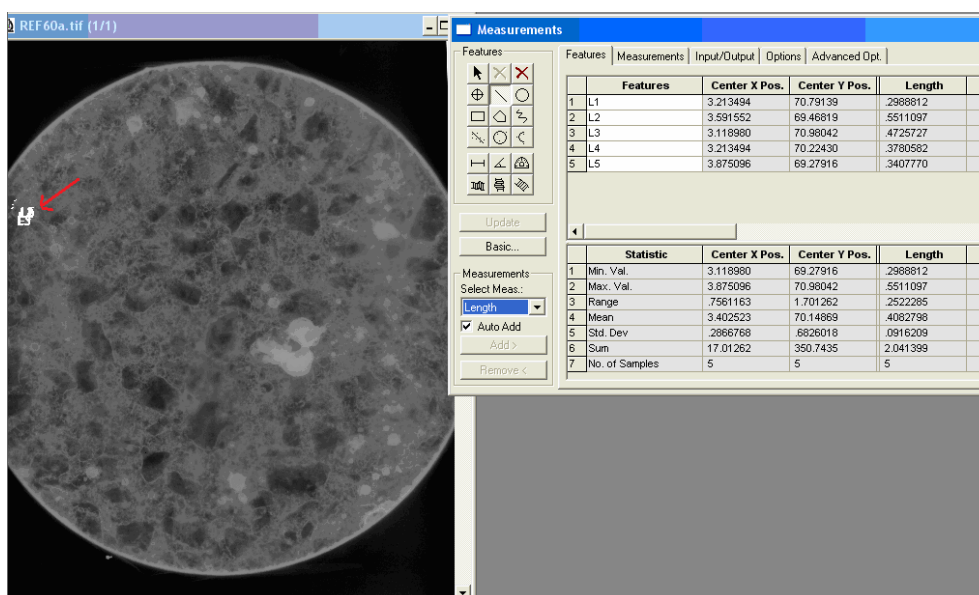


Figura 4.11: Imagem neutrongráfica do C P com Concreto de Referência sob compressão de 60% do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.11 (a) mostra a imagem neutrongráfica do corpo de prova de Concreto de Referência, após serem submetidos à compressão de 60% do seu valor de

ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissuras concorrentes, sendo estas medidas, divididas igualmente em duas áreas distintas nesse corpo de prova.

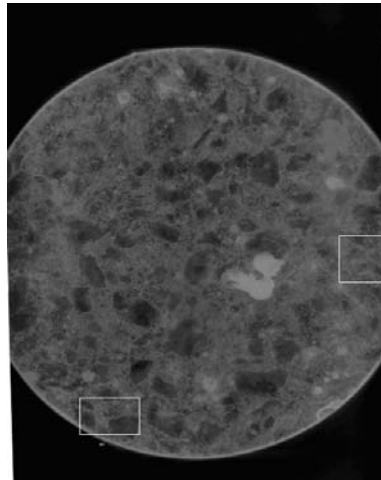


Figura 4.11 (a): Imagem neutrongráfica do C P Concreto de Referência, após compressão de 60 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.11 (b) mostra em detalhe a área inferior esquerda, discriminada na figura 4.11 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

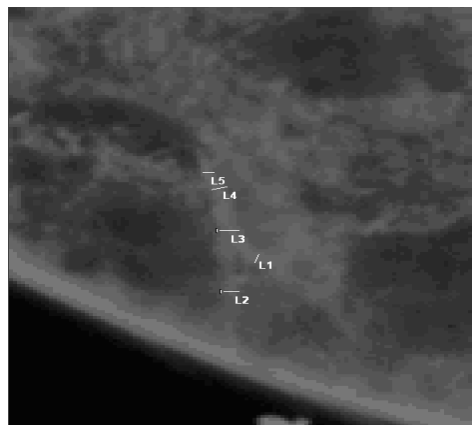


Figura 4.11 (b): Imagem ampliada da área inferior esquerda, discriminada na fig.4.11 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.8 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.11 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.8 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.11 (b)

Medidas	Largura (μm)
L ₁	298
L ₂	378
L ₃	472
L ₄	389
L ₅	283
Val. Mínimo	283
Val. Máximo	472
Val. Médio	364
Desv. Padrão	68

Com relação aos valores mínimo e máximo listados na tabela acima que são 283 μm e 472 μm , respectivamente, obteve-se uma variação relativa de 40%.

A figura 4.11 (c), mostra em detalhe a área superior direita, discriminada na figura 4.11 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

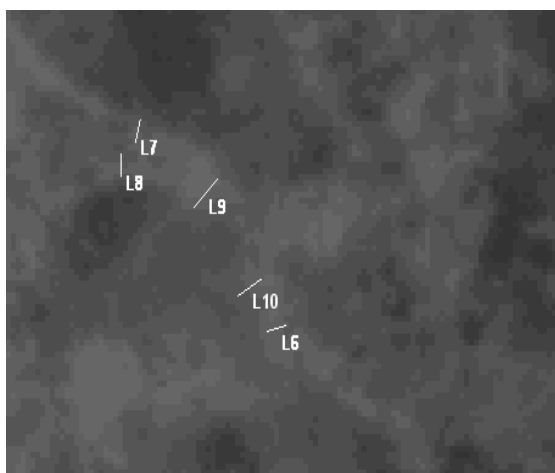


Figura 4.11 (c): Imagem ampliada da área superior direita, discriminada na fig.4.11 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas.

A tabela 4.8 (b), mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.11 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.8 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.11 (c)

Medidas	Largura (μm)
L ₆	389
L ₇	389
L ₈	378
L ₉	668
L ₁₀	551
Val. Mínimo	378
Val. Máximo	668
Val. Médio	475
Desv. Padrão	115

A tabela 4.8 (b) apresenta um valor mínimo de 378 μm , e um valor máximo de 668 μm , que mostra uma variação relativa de 43%. Há neste corpo 7 microfissuras visíveis.

A tabela 4.9 apresenta os valores mínimo ($\text{Val}_{\text{Mín}}$) e máximo ($\text{Val}_{\text{Máx}}$) das larguras das microfissuras listados nas figuras 4.8 à 4.11 e A 1 à A 4, bem como a variação relativa (Var_{Rel}) entre as mesmas e o número de microfissuras em cada amostra das misturas PP 25 %, PEAD 25 %, PEAD 50 % e Concreto de Referência, após compressão de 60 %.

Tabela 4.9 - Valores Estatísticos Constantes nas Figuras 4.8 a.4.11 e A 1 a A 4.

Figuras	$\text{Val}_{\text{Mín}}$ (μm)	$\text{Val}_{\text{Máx}}$ (μm)	Var_{Rel} (%)	Nº de microfissuras
4.8	340	472	28	7
4.9	267	340	21	11
4.10	211	378	44	13
4.11	291	551	47	15
A 1	283	340	17	7
A 2	211	267	20	11
A 3	481	719	33	13
A 4	298	340	12	15

4.3.2 - Compressão a 80 % do Valor de Ruptura

O quinto corpo de prova inspecionado foi o composto por 50 % do granulado PEAD substituindo, na proporção de 50 %, a areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, quando submetido à compressão de 80 % do seu valor de ruptura.

As tabelas agregadas às figuras 4.12, A.5, 4.12 (a), (b) e (c) fornecem as larguras de duas microfissuras ao longo de suas extensões, de forma a se obter, em cada uma delas, cinco medidas. As larguras das dez microfissuras medidas aleatoriamente em duas áreas do corpo de prova, encontram-se nas tabelas 4.10 (a) e (b).

Em função dos valores obtidos pela figura 4.12, observa-se uma menor diferença relativa, que é de 15%, entre os valores máximos e mínimos. A largura mínima medida foi 340 μm e sua largura máxima, 400 μm , para um valor médio de 362 μm e desvio padrão de 21 μm . Essas medidas apresentaram uma variação relativa de 15 %, ou seja, bem pequena.

Em relação à figura A.5, observa-se uma variação relativa um pouco maior, de 42 %, quando se compara às variações obtidas anteriormente; os valores máximos e mínimos corresponderam a 380 μm e 660 μm , respectivamente, para um valor médio de 535 μm e desvio padrão de 96 μm . Há neste corpo 13 microfissuras visíveis.

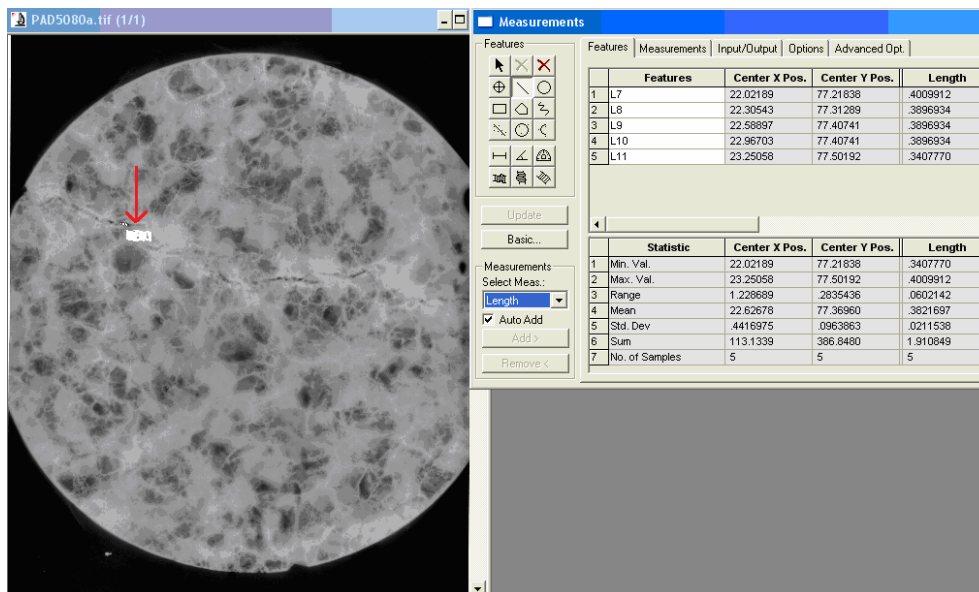


Figura 4.12: Imagem neutrográfica do C.P, com 50% de PEAD, após compressão de 80% do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.12 (a) mostra a imagem neutrográfica do corpo de prova que contém granulados de PEAD, na proporção de 25%, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 80 % do seu valor de

ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissuras concorrentes, sendo estas medidas, divididas igualmente em duas áreas distintas nesse corpo de prova.

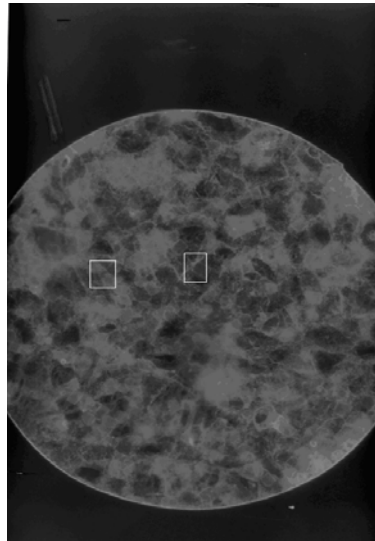


Figura 4.12 (a): Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PEAD, após compressão de 80 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.12 (b), mostra em detalhe a área mais à direita, discriminada na figura 4.12 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

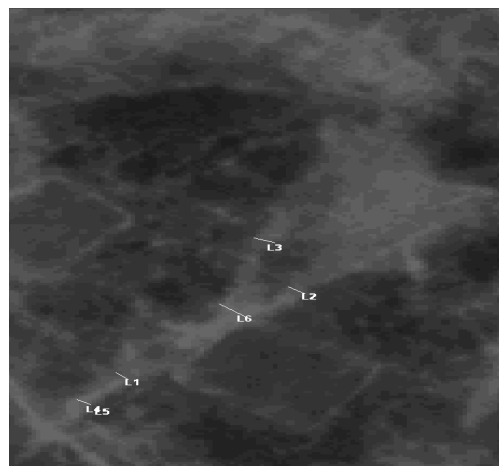


Figura 4.12 (b): Imagem ampliada da área mais direita, discriminada na fig.4.12 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas.

A tabela 4.10 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.12 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.10 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.12 (b)

Medidas	Largura (μm)
L ₁	400
L ₂	472
L ₃	508
L ₄	340
L ₅	871
Val. Mínimo	340
Val. Máximo	871
Val. Médio	432
Desv. Padrão	257

A figura 4.12 (c) mostra em detalhe a área mais à esquerda, discriminada na figura 4.12 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

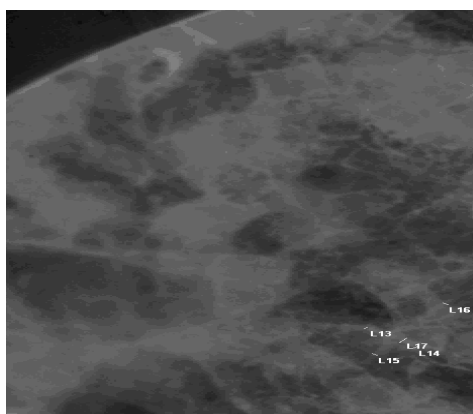


Figura 4.12 (c): Imagem ampliada da área mais a esquerda, discriminada na fig.4.12 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.10 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.10 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.10 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.12 (c)

Medidas	Largura (μm)
L ₁₃	267
L ₁₄	340
L ₁₅	340
L ₁₆	340
L ₁₇	605
Val. Mínimo	267
Val. Máximo	605
Val. Médio	378
Desv. Padrão	342

Em relação à tabela 4.10 (b), ocorreu uma variação relativa de 55 %, entre os valores mínimo e máximo que são 267 μm e 605 μm , respectivamente

Para este corpo de prova foram consideradas as 13 (treze) microfissuras mais visíveis.

A sexta inspeção foi feita em corpos de prova da mesma mistura contendo 25 % PP, porém, quando submetidas a uma compressão de 80 % do seu valor de ruptura. As larguras das microfissuras encontram-se dispostas nas tabelas agregadas às figuras 4.13, A.6, 4.13 (a), (b) e (c), e as tabelas 4.11 (a) e (b).

Verificando-se as larguras das microfissuras obteve-se da figura 4.13, os valores 267 μm para a largura mínima e 422 μm para largura máxima, mostrando uma variação relativa de 36 %; para um valor médio de 344 μm e desvio padrão de 69 μm , que mostrou um aumento médio nas larguras das microfissuras, mas que não revelou uma grande variação entre elas. O mesmo pode se dizer sobre as medidas constante da figura A.6, que resultaram em 551 μm para o valor mínimo e 634 μm para o valor máximo,

correspondendo a uma variação relativa de 13 % para um valor médio de 584 μm e desvio de 40 μm , que significa uma pequena variação entre as medidas.

Foram contadas 16 microfissuras nesta amostra.

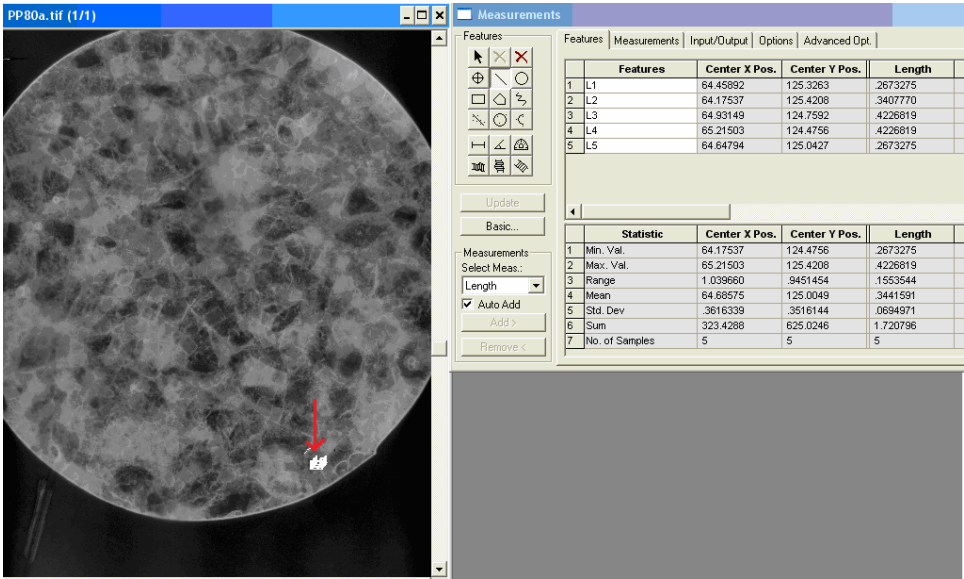


Figura 4.13: Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PP, Após compressão de 80% do valor de ruptura(medidas em mm).

A figura 4.13 (a) mostra a imagem neutrongráfica do corpo de prova que contem granulados de PP, na proporção de 25 %, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 80 % do seu valor de ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissura concorrentes, sendo estas medidas, divididas igualmente em duas áreas distintas nesse corpo de prova.

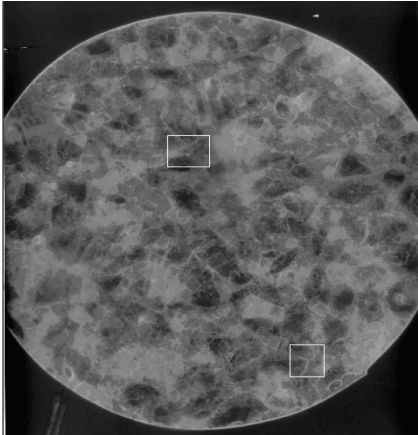


Figura 4.13 (a): Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PP, após compressão de 80 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.13 (b) mostra em detalhe a área superior esquerda, discriminada na figura 4.13 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

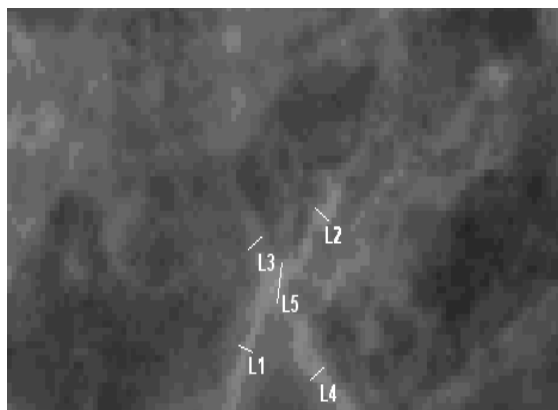


Figura 4.13 (b): Imagem ampliada da área superior esquerda, discriminada na fig.4.13 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas.

A tabela 4.11 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.13 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.11 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.13 (b)

Medidas	Largura (μm)
L ₁	298
L ₂	340
L ₃	340
L ₄	340
L ₅	574
Val. Mínimo	298
Val. Máximo	574
Val. Médio	379
Desv. Padrão	99

Analisando a tabela 4.11 (a) acima, observa-se que, o valor da largura mínima dentre as microfissuras medidas é de 298 μm e o valor máximo de 574 μm , acarretando uma variação relativa entre estas medidas de 48%.

A figura 4.13 (c) mostra em detalhe a área inferior direita, discriminada na figura 4.13 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.



Figura 4.13 (c): Imagem ampliada da área inferior direita, discriminada na fig.4.13 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.11 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.13 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição; menor e maior largura, largura média; e desvio padrão associado.

Tabela 4.11 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.13 (c)

Medidas	Largura (μm)
L ₆	283
L ₇	283
L ₈	400
L ₉	267
L ₅₁₀	756
Val. Mínimo	267
Val. Máximo	756
Val. Médio	398
Desv. Padrão	185

Para os valores das larguras das microfissuras listados na tabela 4.11 (b) a variação relativa é de 64%, comparando o valor mínimo de 267 μm , com o valor máximo medido.

O sétimo corpo de prova inspecionado foi confeccionado com o Concreto de Referência após ser submetido à compressão de 80%. Os dados referentes às fissuras observadas foram dispostos nas figuras 4.14, A7 e 4.14 (a),(b) e (c) e nas tabelas 4.12 (a) e (b).

Analisando a tabela agregada na figura 4.14, observa-se que a largura mínima da microfissura foi de 482 μm , sendo a largura máxima 662 μm . A respeito desses valores, verifica-se que sua variação relativa foi de 15%, para um valor médio de 569 μm e um desvio padrão de 57 μm .

A respeito da figura A.7 as larguras das microfissuras demonstram-se bem comportadas, com uma variação relativa de 21%, o que se pode verificar, observando-se os valores mínimo de 267 μm máximo de 340 μm ; para um valor médio de 318 μm e um desvio padrão de 29 μm .

Há 19 microfissuras consideradas nesta amostra.

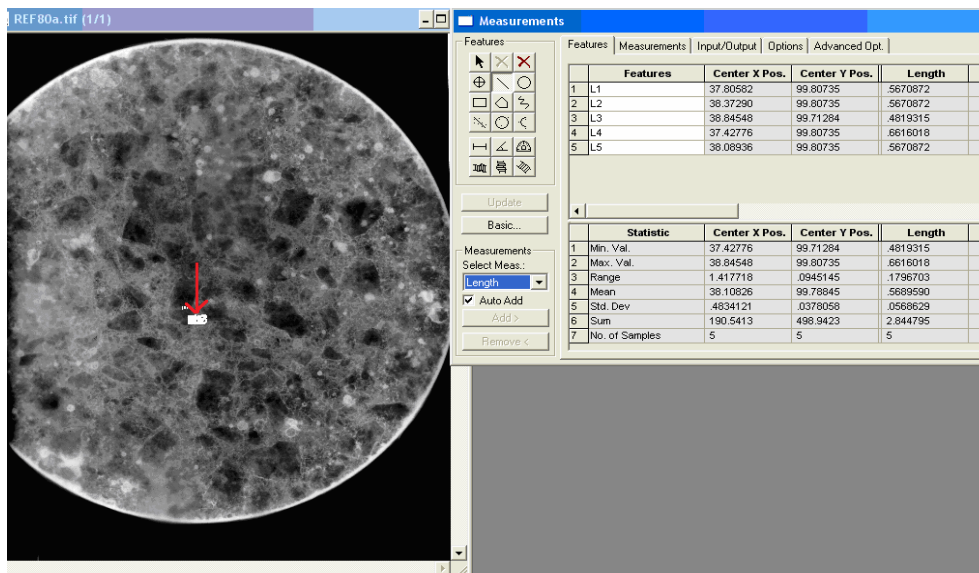


Figura 4.14: Imagem neutrográfica do C P concreto de referência Sob compressão de 80 % do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.14 (a) mostra a imagem neutrográfica do corpo de prova Concreto de Referência, após serem submetidos à compressão de 80% do seu valor de ruptura,

onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissura concorrentes, sendo estas medidas, divididas igualmente em duas áreas distintas nesse corpo de prova.

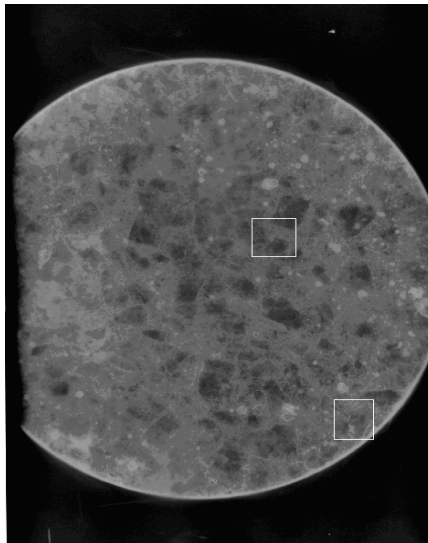


Figura 4.14 (a): Imagem neutrongráfica do C P Concreto de Referência, após compressão de 80% do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.14 (b) mostra em detalhe a área inferior direita, discriminada na figura 4.14 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

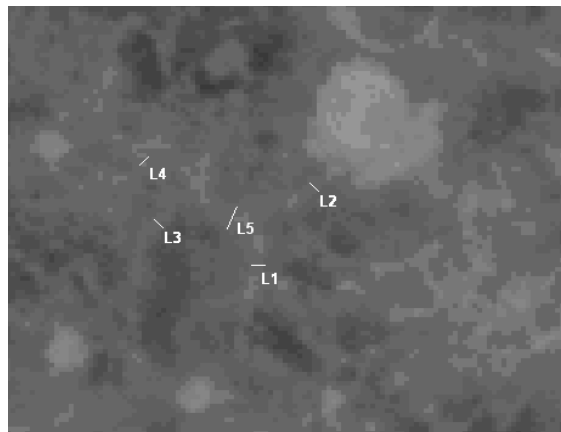


Figura 4.14 (b): Imagem ampliada da área inferior direita, discriminada na fig.4.14 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.12 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.14 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição; menor e maior largura, largura média; e desvio padrão associado.

Tabela 4.12 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.14 (b)

Medidas	Largura (μm)
L ₁	283
L ₂	267
L ₃	267
L ₄	267
L ₅	508
Val. Mínimo	267
Val. Máximo	508
Val. Médio	318
Desv. Padrão	95

Nesta tabela verifica-se uma variação relativa de 47%, quando compara-se o valor mínimo (267 μm) e o valor máximo (508 μm).

A figura 4.14 (c) mostra em detalhe a área superior, discriminada na figura 4.14 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.



Figura 4.14 (c): Imagem ampliada da área superior, discriminada na fig.4.14 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas.

A tabela 4.12 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.14 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.12 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.14 (c).

Medidas	Largura (μm)
L ₆	422
L ₇	340
L ₈	378
L ₉	389
L ₁₀	845
Val. Mínimo	340
Val. Máximo	845
Val. Médio	475
Desv. Padrão	186

A tabela 4.12 (b) mostra os valores mínimo e máximo da largura das microfissuras, que são 340 μm e 845 μm , respectivamente, com estes valores, avaliamos o valor da variação relativa, que é de 59%.

O corpo de prova seguinte inspecionado foi o composto pelo granulado PEAD 25%, em substituição à areia grossa na proporção de 25 %, como foi relatado no capítulo 3, quando submetido à compressão de 80 % do seu valor de ruptura.

Com a análise das figuras 4.15, A.8, 4.15 (a) e (b) obteremos os valores das larguras das microfissuras no interior de duas microfissuras realizando em cada uma delas cinco medidas de largura, ao longo de sua extensão.

Pela figura 4.15 observa-se que 341 μm e 472 μm foram os valores mínimos e máximos de largura das microfissuras, respectivamente, correspondendo a uma variação relativa de 27 %. Além disso, nota-se que esses valores se repetem para as microfissuras mostradas que são as mesmas medidas na figura A.8, diferindo, entretanto, em relação às larguras médias, a saber: 436 μm e 391 μm , respectivamente.

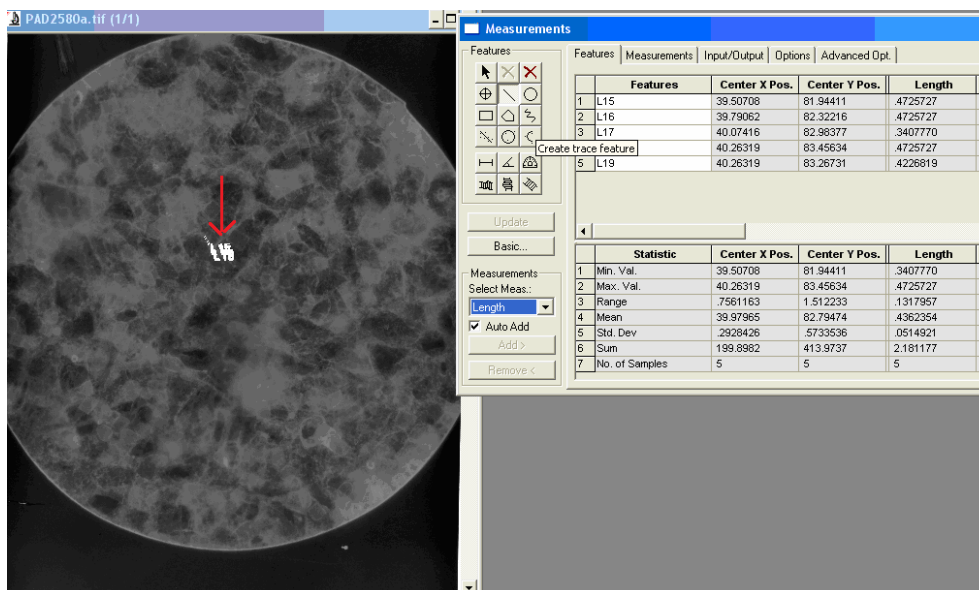


Figura 4.15: Imagem neutrográfica do C P com 25% de PEAD, após compressão de 80% do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.15 (a) mostra a imagem neutrográfica do corpo de prova que contem granulados de PEAD, na proporção de 25%, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 80% do seu valor de ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissura concorrentes, sendo estas medidas, divididas igualmente em duas áreas distintas.

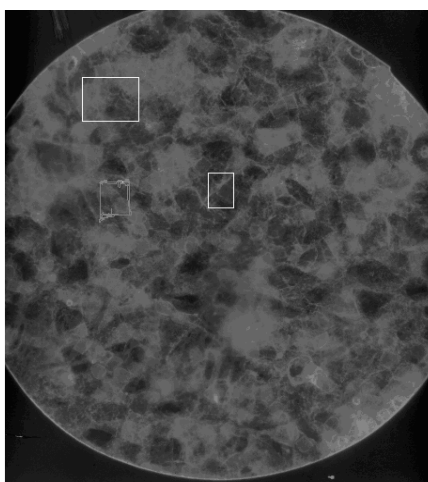


Figura 4.15 (a): Imagem neutrográfica do C P com 25% de PEAD, após compressão de 80 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.15 (b) mostra em detalhe a área mais a direita, discriminada na figura 4.15 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

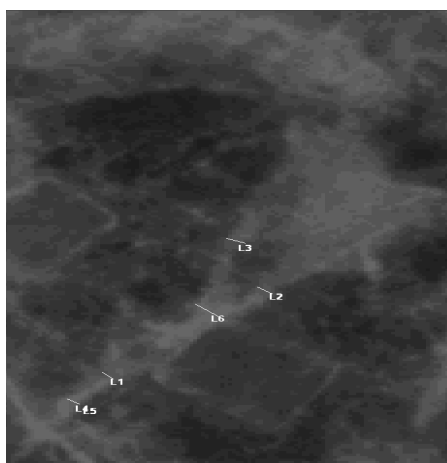


Figura 4.15 (b): Imagem ampliada da área à direita, discriminada na fig.4.15 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.13 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.15 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.13(a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.15 (b)

Medidas	Largura (μm)
L ₁	400
L ₂	472
L ₃	508
L ₄	340
L ₅	871
Val. Mínimo	340
Val. Máximo	871
Val. Médio	432
Desv. Padrão	257

Em função dos valores mínimo e máximo das larguras das microfissuras listados na tabela 4.11 (a), que são 340 μm e 871 μm , respectivamente, avaliou-se o valor da variação relativa de 60%.

A figura 4.15 (c) mostra em detalhe a área mais à esquerda, discriminada na figura 4.15 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

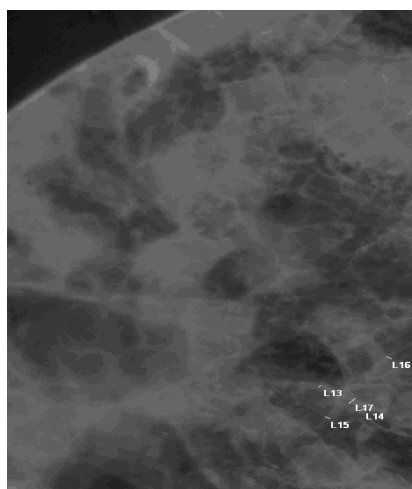


Figura 4.15 (c): Imagem ampliada da área mais a esquerda, discriminada na fig.4.15 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.13 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.15 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição; menor e maior largura, largura média; e desvio padrão associado.

Tabela 4.13 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.15 (c)

Medidas	Largura (μm)
L ₁₃	267
L ₁₄	340
L ₁₅	340
L ₁₆	340
L ₁₇	605
Val. Mínimo	267
Val. Máximo	605
Val. Médio	378
Desv. Padrão	67

A tabela 4.13 (b) mostra o valor mínimo para a largura das microfissuras de 267 μm e valor máximo de 605 μm . Com base nesses valores obteve-se uma variação relativa de 55%.

A tabela 4.14 apresenta os valores mínimo ($\text{Val}_{\text{Mín}}$) e máximo ($\text{Val}_{\text{Máx}}$) das larguras das microfissuras listados nas figuras 4.12 à 4.15 e A 5 à A 8, bem como a variação relativa (Var_{Rel}) entre as mesmas e o número de microfissuras em cada amostra das misturas PP 25%, PEAD 25%, PEAD 50% e Concreto de Referência, após compressão de 80 % do seus valores de ruptura.

Tabela 4.14 Valores Estatísticos Constantes nas Figuras 4.12 a.4.15 e A 5 a A 8.

Figuras	$\text{Val}_{\text{Mín}}$ (μm)	$\text{Val}_{\text{Máx}}$ (μm)	Var_{Rel} (%)	Nº de microfissuras
4.12	340	400	15	13
4.13	267	442	36	16
4.14	481	568	15	19
4.15	291	551	47	20
A 5	380	660	42	13
A 6	551	634	13	16
A 7	267	340	21	19
A 8	340	472	12	20

4.3.3 - Compressão a 100 % do Valor de Ruptura.

Outro corpo de prova inspecionado foi o composto por 25% de granulado PP, em substituição, na proporção de 25%, à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, sendo submetido à compressão de 100% do seu valor de ruptura.

Pelas figuras 4.16 e A.9, 4.16 (a) e (b), e tabelas 4.15 (a) e (b), obteve-se os valores das larguras das microfissuras. No interior de duas microfissuras e ao longo delas, cinco medidas foram realizadas.

A respeito da figura 4.16, pode-se afirmar que, apesar das larguras terem aumentado, seus valores máximo (756 μm) e mínimo (661 μm) variaram pouco, cerca de 12% de diferença relativa; o valor médio foi de 680 μm , para um desvio padrão de 37 μm .

Com relação às informações sobre as medidas das larguras das microfissuras constantes na figura A.9, o mesmo pode ser dito, pois elas variaram pouco em relação a

seus valores máximo (845µm) e mínimo (681 µm), demonstrando uma variação relativa de 21,8 %, valor médio de 779 µm e um desvio padrão de 61 µm. Foram contadas 26 (vinte e seis) microfissuras nessa amostra.

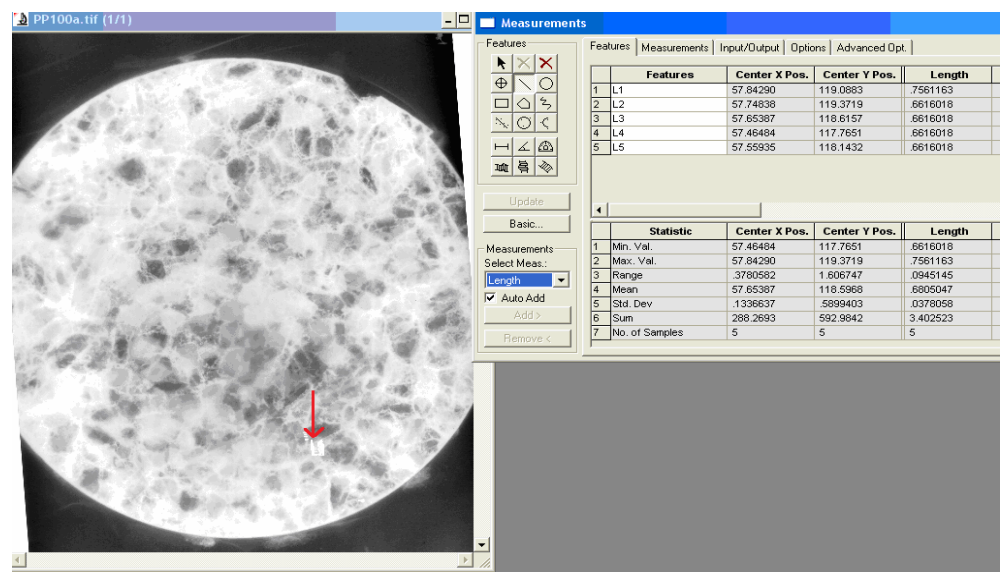


Figura 4.16: Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PP, Após compressão de 100% do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.16 (a) mostra a imagem neutrongráfica do corpo de prova que contem granulados de PP, na proporção de 25%, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 100% do seu valor de ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissuras concorrentes, sendo estas medidas, divididas igualmente em duas áreas distintas.

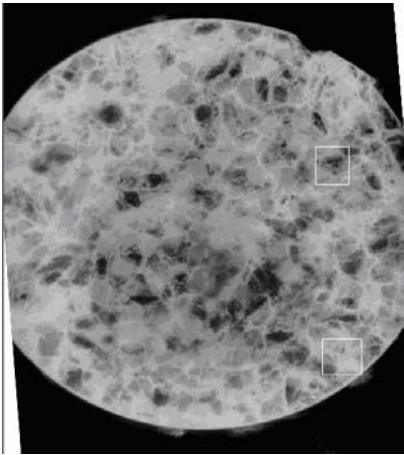


Figura 4.16 (a): Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PP, após compressão de 100 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.16 (b) mostra em detalhe a área inferior direita, discriminada na figura 4.16 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

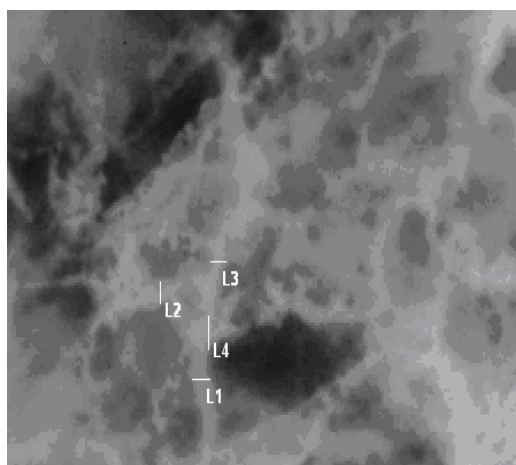


Figura 4.16 (b): Imagem ampliada da área inferior direita, discriminada na fig.4.16 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.15 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.16 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.15 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.16 (b).

Medidas	Largura (μm)
L ₁	756
L ₂	756
L ₃	661
L ₄	668
L ₅	1.134
Val. Mínimo	756
Val. Máximo	1.134
Val. Médio	827
Desv. Padrão	181

Nessa tabela 4.15 (a), obteve-se uma variação relativa de 33%, para os valores mínimo e máximo de 756 μm e 1.134 μm , respectivamente.

A figura 4.16 (c) mostra em detalhe a área mais acima, discriminada na figura 4.16 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

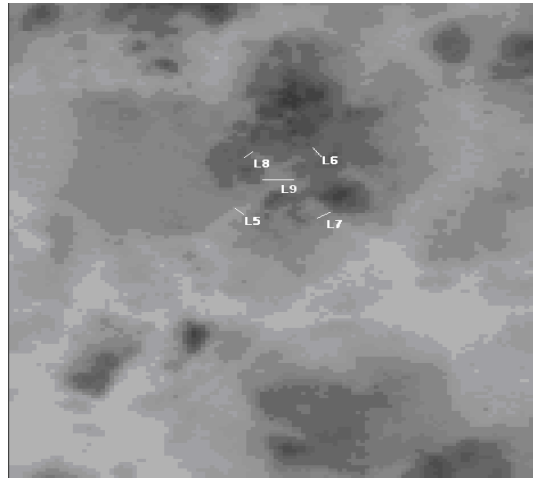


Figura 4.16 (c): Imagem ampliada da área acima, discriminada na fig.4.16 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas .

A tabela 4.15 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.16 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.15 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.16 (c).

Medidas	Largura (μm)
L ₆	267
L ₇	340
L ₈	340
L ₉	267
L ₁₀	661
Val. Mínimo	267
Val. Máximo	661
Val. Médio	375
Desv. Padrão	146

Na análise seguinte, o corpo de prova, cuja mistura de 25 % do granulado PEAD em substituição aos 25 % de areia grossa, como foi comentado no capítulo 3, foi submetido à compressão de 100 % do seu valor de ruptura.

Analisando a tabela 4.15 (b), verifica-se o valor de 267 μm para o mínimo valor das larguras das microfissuras e 661 μm , para o valor máximo e 59 % para a variação relativa.

As larguras das microfissuras encontram-se dispostas nas tabelas agregadas às figuras 4.17, A.10, 4.17 (a) e (b) e nas tabelas 4.16 (a) e (b).

Um caso interessante aconteceu nas microfissuras visualizadas na figura 4.17 as larguras mínima e máxima coincidiram em 340 μm . Em relação aos valores mostrados na figura A.10, houve uma pequena variação entre as larguras das microfissuras: mínima de 400 μm e máxima de 472 μm , (diferença relativa de 15 %). A largura média resultou em 443 μm , para um desvio padrão de 35 μm .

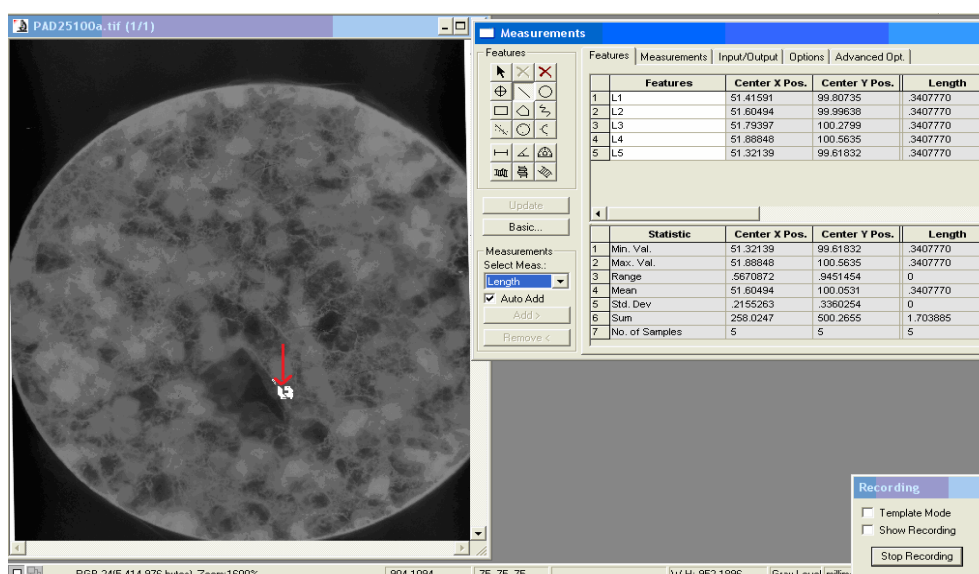


Figura 4.17: Imagem neutrográfica do C P com 25% de PEAD, Após compressão de 100% do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.17 (a) mostra a imagem neutrográfica do corpo de prova que contem granulados de PEAD, na proporção de 25 %, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 100% do seu valor de ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissura concorrentes, sendo estas medidas, divididas igualmente em duas áreas distintas.

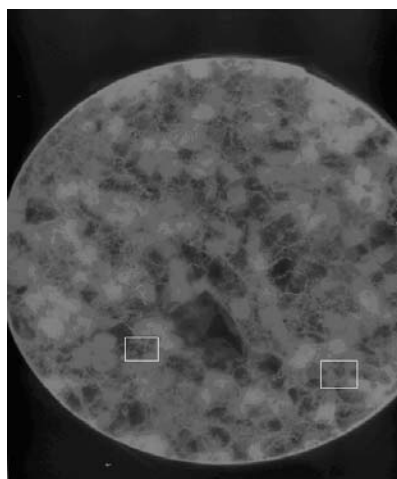


Figura 4.17 (a): Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PEAD, após compressão de 100 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas

A figura 4.17 (b) mostra em detalhe a área mais a direita, discriminada na figura 4.17 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

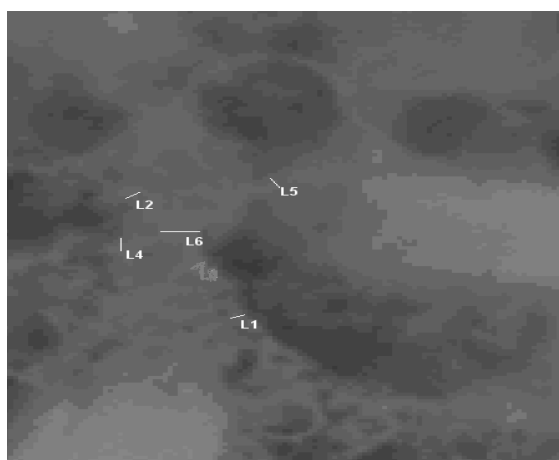


Figura 4.17 (b): Imagem ampliada da área à direita, discriminada na fig.4.17 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.16 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.17 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição; menor e maior largura, largura média; e desvio padrão associado.

Tabela 4.16 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.17 (b).

Medidas	Largura (μm)
L_1	298
L_2	340
L_4	378
L_5	340
L_6	756
Val. Mínimo	298
Val. Máximo	756
Val. Médio	422
Desv. Padrão	93

Com relação aos valores mínimo e máximo das larguras das microfissuras listados na tabela 4.16 (a), que são 298 μm e 756 μm , respectivamente, a variação relativa é de 65%.

A figura 4.17 (c) mostra em detalhe a área mais à esquerda, discriminada na figura 4.17 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

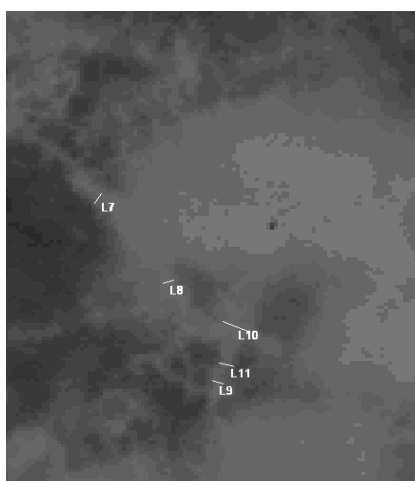


Figura 4.17 (c): Imagem ampliada da área à esquerda, discriminada na fig.4.17 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas.

A tabela 4.16 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.17 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição; menor e maior largura, largura média; e desvio padrão associado.

Tabela 4.16 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.17 (c).

Medidas	Largura (μm)
L ₇	298
L ₈	340
L ₉	378
L ₁₀	340
L ₁₁	756
Val. Mínimo	298
Val. Máximo	756
Val. Médio	409
Desv. Padrão	158

Nessa tabela 4.16 (b), obteve-se uma variação relativa de 33 %, para os valores mínimo e máximo de 298 μm e 756 μm , respectivamente.

No tocante às microfissuras originadas no corpo de prova composto por 50 % de granulado PEAD, na proporção de 50 % à areia grossa, após ser submetido à compressão de 100% do valor de ruptura, a tabela constante na figura 4.18 mostra que suas larguras mínima e máxima diferiram em 27 %, sendo que 340 μm e 482 μm , respectivamente, e, na média, 419 μm , para um desvio padrão de 52 μm .

Analogamente, em relação à figura A.11, observa-se que as larguras das microfissuras se aproximaram mais do valor máximo, registrado na tabela anexa à figura 4.18. Apesar disso, não houve uma variação percentual de 10 % entre as larguras mínima (422 μm) e máxima (472 μm), sendo 432 μm a largura média para desvio padrão de 20 μm . Há 39 (trinta e nove) microfissuras geradas pela carga de compressão aplicada.

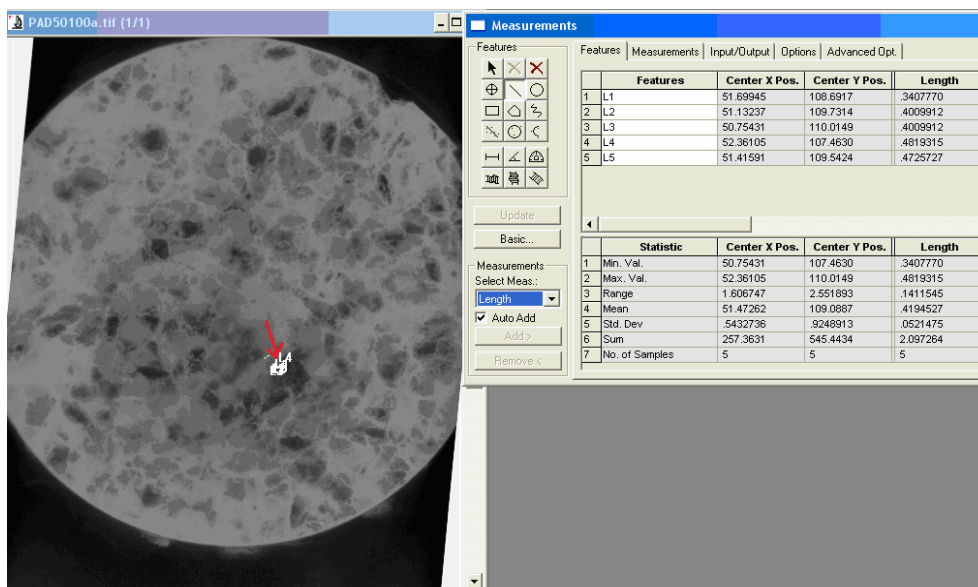


Figura 4.18: Imagem neutrográfica do C P com 50 % de PP, Após compressão de 100% do valor de ruptura (medidas em mm).

A figura 4.18 (a) mostra a imagem neutrográfica do corpo de prova que contém granulados de PEAD, na proporção de 50 %, em substituição à areia grossa, como foi relatado no capítulo 3, após serem submetidos à compressão de 100% do seu valor de ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissuras concorrentes, sendo estas medidas divididas igualmente em duas áreas distintas.

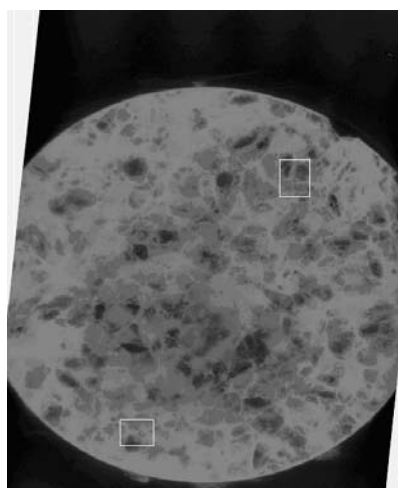


Figura 4.18 (a): Imagem neutrográfica do C P com 50 % de PEAD, após compressão de 100 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas

A figura 4.18 (b) mostra em detalhe a área direita superior, discriminada na figura 4.18 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

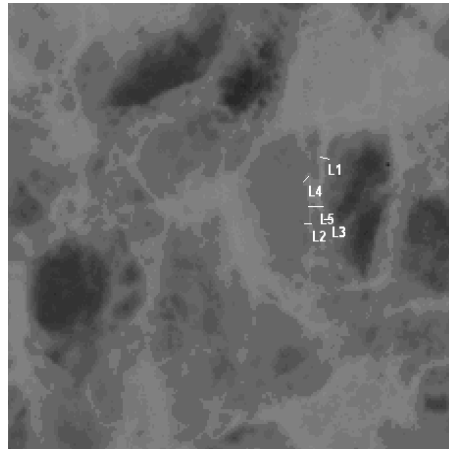


Figura 4.18 (b): Imagem ampliada da área à direita, discriminada na fig.4.18 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.17 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.18 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.17 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.18 (b).

Medidas	Largura (μm)
L ₁	481
L ₂	378
L ₃	378
L ₄	400
L ₅	756
Val. Mínimo	378
Val. Máximo	756
Val. Médio	479
Desv. Padrão	143

Com relação os valores mínimo e máximo das larguras das microfissuras listados na tabela 4.14 (a), que são 378 μm e 756 μm , respectivamente e variação relativa de 50%.

A figura 4.18 (c) mostra em detalhe a área esquerda, discriminada na figura 4.18 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

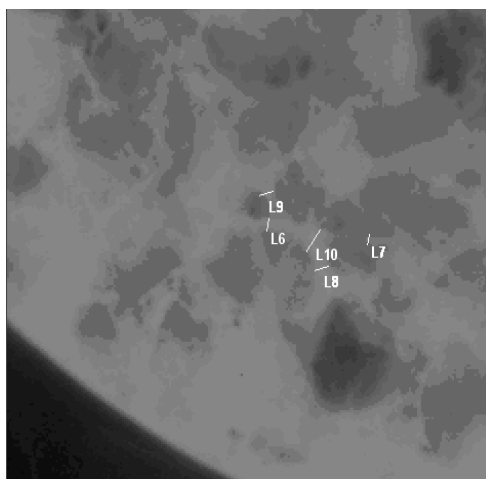


Figura 4.18 (c): Imagem ampliada da área à esquerda discriminada na fig.4.18 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas.

A tabela 4.17 (b) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.18 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.17 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.18 (c).

Medidas	Largura (μm)
L ₆	574
L ₇	481
L ₈	688
L ₉	688
L ₁₀	1.153
Val. Mínimo	481
Val. Máximo	1.153
Val. Médio	717
Desv. Padrão	231

Analisando a tabela 4.17 (b), verifica-se o valor de 481 μm para o mínimo valor das larguras das microfissuras e 1.153 μm para o valor máximo e 58 % para a variação relativa.

Para os corpos de prova constituídos de Concreto de Referência, submetidos à compressão de 100 % do seu valor de ruptura, os dados constantes das tabelas anexas às figuras 4.19, A.12, 4.19 (a) e (b) e as tabelas 4.18 (a) e (b), foram levados em consideração. Na tabela anexa à figura 4.19, as larguras mínima (472 μm) e máxima (534 μm) diferenciaram-se percentualmente de 11,6 %. A largura média foi de 485 μm e o desvio padrão de 25 μm .

Na tabela agregada à figura A.12 constam os valores de 267 μm para a largura mínima das microfissuras e 472 μm para o máximo, resultando numa diferença relativa de 43 % e num valor médio de 364 μm , para um desvio padrão de 66 μm .

Trinta microfissuras foram visualizadas.

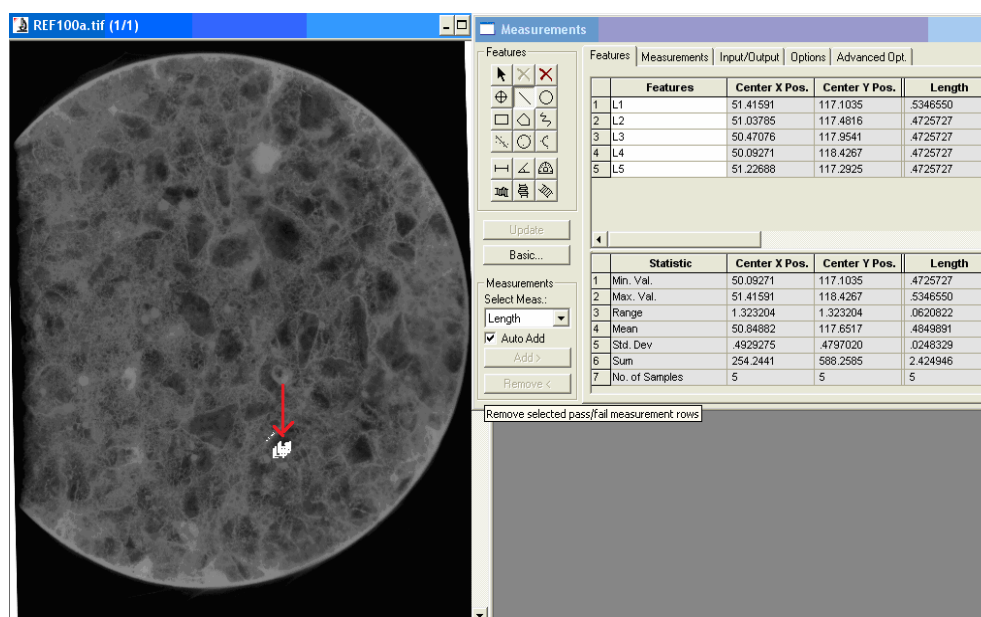


Figura 4.19: Imagem : Imagem neutrográfica do C P com Referência Sob Compressão de 100 % do Valor de Ruptura (medidas em mm).

A figura 4.19 (a) mostra a imagem neutrográfica do corpo de prova de Concreto de Referência, após ser submetido à compressão de 100 % do seu valor de ruptura, onde foram feitas dez medidas ao longo de diferentes microfissura concorrentes, sendo estas medidas divididas igualmente em duas áreas distintas.

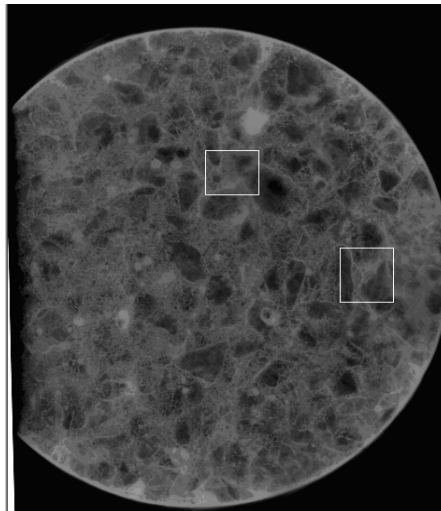


Figura 4.19 (a): Imagem Neutronográfica do C P Concreto de Referência, após compressão de 100 % do valor de ruptura, mostrando as áreas onde foram feitas as medidas.

A figura 4.19 (b) mostra em detalhe a área esquerda, discriminada na figura 4.19 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

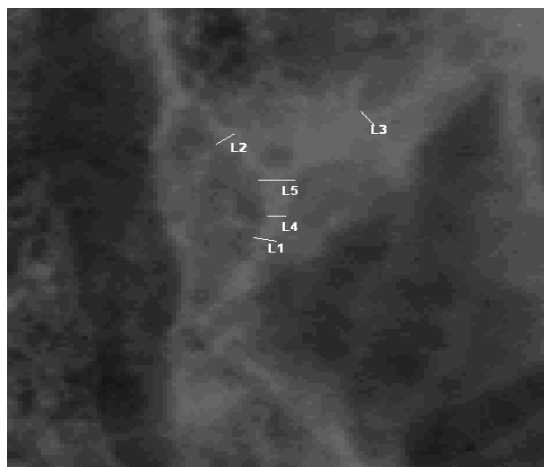


Figura 4.19 (b): Imagem ampliada da área à esquerda, discriminada na fig.4.19 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas

A tabela 4.18 (a) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.19 (b), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.18 (a): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.19 (b).

Medidas	Largura (μm)
L ₁	481
L ₂	472
L ₃	472
L ₄	378
L ₅	756
Val. Mínimo	378
Val. Máximo	756
Val. Médio	512
Desv. Padrão	127

Analisando a tabela 4.18 (a), verifica-se o valor de 378 μm para o mínimo valor das larguras das microfissuras e 756 μm para o valor máximo e 50 % para a variação relativa.

A figura 4.19 (c) mostra em detalhe a área direita, discriminada na figura 4.19 (a), onde foram feitas cinco medidas ao longo de duas ou mais microfissuras concorrentes.

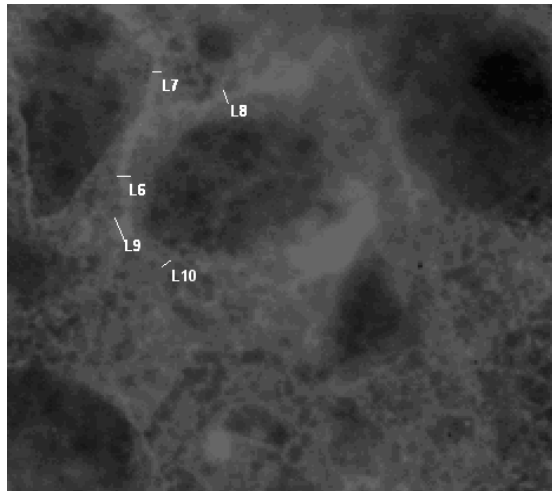


Figura 4.19(c): Imagem ampliada da área à direita, discriminada na fig.4.19 (a), mostrando em detalhe onde foram feitas as cinco medidas.

A tabela 4.18 (6) mostra os valores das medidas que foram levantadas na figura 4.19 (c), tais como: largura das microfissuras em cada posição, menor e maior largura, largura média e desvio padrão associado.

Tabela 4.18 (b): Valores estatísticos das medidas feitas na figura 4.19 (c)

Medidas	Largura (μm)
L ₆	567
L ₇	378
L ₈	597
L ₉	1.228
L ₁₀	472
Val. Mínimo	378
Val. Máximo	1.228
Val. Médio	648
Desv. Padrão	299

Com relação aos valores mínimo e máximo das larguras das microfissuras listados na tabela 4.18 (b), que são 378 μm e 1.228 μm , respectivamente, a variação relativa é de 69 %.

A tabela 4.19, apresenta os valores mínimo (Val_{Mín}) e valores máximo (Val_{Máx}) das larguras das microfissuras, listados nas figuras 4.16 à 4.19 e A 9 à A 12 bem como a variação relativa (Var_{Rel}) entre as mesmas e o número de microfissuras em cada amostra das misturas PP 25 %, PEAD 25 %,PEAD 50% e Concreto de Referência, após compressão de 100 %.

Tabela 4.19 Valores Estatísticos Contantes nas Figuras 4.16 a.4.19 e A 9 a A 12

Figuras	Val _{Mín} (μm)	Val _{Máx} (μm)	Var _{Rel} (%)	Nº de microfissuras
4.16	661	756	12	26
4.17	340	340	0	39
4.18	340	482	27	19
4.19	472	534	11	30
A 9	681	845	22	26
A 10	400	472	15	39
A 11	422	472	10	19
A 12	267	472	43	30

Verificou-se que o número das microfissuras era maior, à medida que se aumentava a carga de compressão, como se esperava. A contagem das microfissuras existentes, em cada corpo de prova inspecionado, após ser submetido a diferentes cargas de compressão mostrou esse comportamento, de acordo com as tabelas 4.9; 4.14 e 4.19. Por exemplo, o corpo de prova composto de 25 % de granulado PP, quando exposto à carga de compressão de 60 % do valor de ruptura, foram registradas 7 microfissuras, Tabela 4.9. Ao se aumentar a carga para 80 % do valor de ruptura, 16 microfissuras foram observadas Tabela 4.14. Para carga de compressão de 100 % da ruptura, apareceram 26 delas Tabela 4.19.

Em relação aos demais corpos de prova, os ensaios neutrongráficos mostraram que o comportamento foi semelhante, ou seja, o número de microfissuras aumentou quando se aumentou a carga de compressão Tabelas 4.9, 4.14 e 4.19.

Em relação à largura média das microfissuras, observou-se que elas também se alargavam ao se aumentar a carga de compressão. Apesar disso, considerando-se as larguras das microfissuras assinaladas nas figuras 4.8 à 4.19, concluiu-se que, após a realização da medida dessas larguras ao longo delas, em cinco posições diferentes, a variação relativa entre os valores máximos e o mínimo das larguras das microfissuras era pequena como se demonstraram as imagens neutrongráficas apresentadas nas figuras 4.8 a 4.19.

Considerando os resultados das propriedades mecânicas dos concretos especiais e do Concreto de Referência, e as larguras das microfissuras que aparecem após compressão de 60 %, 80 % e 100 %, espera-se que as misturas com melhor desempenho mecânico, também apresentem melhores resultados em termos das larguras das microfissuras. Quando consideramos as misturas 25 % de PP, 25 % e 50 % de PEAD e o Concreto de Referência, submetidos a 60 % da compressão de ruptura tabela 4.9, vemos que o Concreto de Referência, obteve o melhor desempenho e observando os valores das larguras das microfissuras listados nas figuras 4.11 e A.4, obtém-se o valor médio das larguras das microfissuras que são 408 μm e 315 μm , o primeiro valor não transmite o resultado obtido na análise mecânica, pois o que ocorreu foi que a maior medida (551 μm), foi feita em um ponto de concorrência entre duas ou mais microfissuras, como pode ser visto na figura 4.11, em que as cinco medidas feitas ao

longo da microfissura nos dá os seguintes valores: 298 μm , 551 μm , 472 μm , 378 μm e 340 μm , o que fica bem evidente que este valor é anômalo. Porém o segundo corpo de prova de melhor resultado, o concreto especial que utiliza o granulado PP à proporção de 25 %, em substituição a areia grossa, seus resultados em termos de largura das microfissuras, relatam bem o seu desempenho mecânico, o mesmo ocorre com os demais corpos de prova.

Com relação à compressão de 80% de ruptura, aplicada aos corpos de prova contendo as misturas de 25% de PP, 25% de PEAD, 50% de PEAD e o Concreto de Referência tabela 4.14, observou-se que a mistura, contendo o granulado PP a 25%, continua tendo um desempenho melhor que os demais corpos de prova de concreto especiais, ou seja, os compostos pelos granulados PEAD a 25 e 50% deste material em substituição à areia grossa, porém como no caso anterior, o Concreto de Referência obteve melhor desempenho no tocante as propriedades mecânicas.

Porém olhando as larguras das microfissuras de todas as misturas, obtidas através das Neutronografias, como mostram as figuras 4.12 até 4.15 e as figuras A 5 até A 8, Tabela 4.14, não vemos o mesmo desempenho, tanto do concreto que utiliza o granulado PP e o Concreto de Referência, como pode ser visto nas figuras 4.13 e 4.14 e figuras A 7 e A 8, os dois concretos obtiveram um desempenho semelhante, mas inferior se comparado com as figuras as figuras 4.15 e A 8, que mostram o desempenho do corpo de prova que se utiliza do granulado PEAD à 25 %.

No tocante a análise do desempenho dos corpos de prova contendo as misturas de 25 % de PP, 25 % de PEAD, 50 % de PEAD e o Concreto de Referência, quando submetidos à compressão de 100 % do seu valor de ruptura tabela 4.19, o Concreto de Referência continua levando vantagem sobre as demais misturas; o corpo de prova que se utiliza do granulado a 25 % de PP, sobre ambas as misturas que utilizam o granulado PEAD, no tocante as propriedades mecânicas.

Finalmente, analisou-se as Neutronografias mostradas nas figuras 4.16 a 4.19 e as figuras A.9 á A.12, Tabela 4.19 que mostram um desempenho diferente dos observados na análise mecânica, onde os corpos de prova que se utilizam dos granulados PEAD possuem as menores larguras das microfissuras, em comparação com os corpos de

prova que utilizam de 25 % de PP e do Concreto de Referência, sendo o pior desempenho do granulado PP, que possui as seguintes medidas 661 μm para o valor mínimo e 756 μm para o valor máximo, segundo a figura 4.16, além dos valores listados na figura A 9, que são 681 μm e 779 μm , para os valores mínimo e máximo, respectivamente.

Outra análise feita foi em torno do caso anômalo registrado e comentado na figura 4.11. São analisadas as figuras 4.8 a 4.19 (a), (b) e (c) e as tabelas 4.5 a 4.18 (a) e (b) para abordar esta análise; os dados obtidos, relativos às medidas efetuadas nas figuras 4.8 a 4.19 (b) e (c), são expressos nas tabelas. Observando os valores mínimo e máximo das larguras das microfissuras listados nas tabelas 4.5 a 4.18 (a) e (b) e levando em consideração suas variações relativas, e comparando com as variações relativas das medidas realizadas nas figuras 4.8 à 4.19, onde se privilegiou-se as medidas ao longo das mesmas, verifica-se uma variação relativa muito maior no primeiro conjunto de medidas em relação ao segundo, como pode ser constatado nos valores constantes das tabelas 4.5 (a) e (b), que mostra uma variação relativa 61 % e 66%, respectivamente, comparando com as figuras 4.9 e A 2, que possuem variações relativas de 21 % e 20 %, respectivamente, esse comportamento se repete em todas as tabelas com pouca variação, os únicos casos que fugiram a este comportamento foram os registrados nas tabelas 4.7 (a) e 4.16 (a), que apresentaram uma variação relativa de 21 % e 33 %, respectivamente, ou seja as larguras das microfissuras tendem a crescer quando uma ou mais microfissuras concorrem em um ponto, sendo aí um ponto onde pode haver um colapso na estrutura.

Procedimento análogo foi realizado com base nos valores dos parâmetros listados na tabela 4.2, a saber: força, dada em kN, e o módulo de elasticidade, para os corpos de prova contendo diferentes misturas e submetidas à carga de compressão de 80% do seu valor de ruptura. Pela tabela 4.3, observou-se que o corpo de prova contendo 25 % de PP continuam mais resistentes do que os contendo granulados de PEAD. Resistiu a uma força de 160 kN contra 126 kN daquele contendo 25 % de granulado de PEAD e 155,10 kN daquele com 50 % de PEAD. Entretanto, a resistência do corpo de prova contendo 25 % de granulado de PP, foi superado em relação ao concreto de referência, que suportou 178,00 kN.

No tocante ao módulo de elasticidade desses corpos de prova quando submetidos à carga de compressão de 80 % do valor de ruptura, observou-se que aquele contendo na mistura 25 % de granulados PP, apresentou o maior valor de elasticidade (16,55 MPa), perante os demais corpos de prova, inclusive os de Concreto de Referência.

Finalmente, analisou-se a resistência dos corpos de prova contendo diferentes misturas com granulados PET e Concreto de Referência, quando submetidos à carga de compressão correspondente a 100 % do seu valor de ruptura. Para tal, foram usados os dados constantes na tabela 4.3, referentes à força, em kN, e o módulo de elasticidade, em MPa.

Da mesma forma, o comportamento do corpo de prova contendo 25 % de granulado do tipo PP revelou-o resistente 259,33 kN, o que significou um desempenho inferior ao do Concreto de Referência, resistiu 373 kN, mas bem superior aos corpos de prova contendo 25 % de granulados de PEAD (134,27 kN) e 50 % de PEAD (170,54 kN), respectivamente.

A respeito do módulo de elasticidade desses corpos de prova, quando submetidos à carga de compressão de 100 % do seu valor de ruptura, verificou-se que o Concreto de Referência comportou-se como o de maior elasticidade como comprova os valores listados na tabela 4.2, a saber: 21,33 MPa, para o Concreto de Referência e 18,08 MPa para o concreto com 25 % de granulado de PP; 6,14 MPa, para a mistura contendo 25 % de granulados de PEAD, e 9,65 MPa para o concreto contendo 50 % de PEAD.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões sobre os testes de compressão e elasticidade:

- Compressão de 60 % do Valor de Ruptura:

- Conclui-se pela tabela 4.1, que o corpo de prova contendo 25 % PP revelou ser mais resistente perante a força de 135 kN, contra 83,57 kN do corpo de prova contendo 25 % PEAD, e 115,14 kN daquele contendo 50 % de PEAD. Entretanto, foi superado, em relação ao Concreto de Referência, que resistiu à força de 178 kN, quando submetido às mesmas condições.
- No tocante ao módulo de elasticidade dos corpos de prova, conclui-se que aquele contendo 25 % de PP, a mistura atingiu um módulo de elasticidade de 18,33 MPa, contra 1,79 Mpa daqueles contendo 25 % de PEAD, 6,22 Mpa do 50 % de PEAD e 10,33 Mpa do Concreto de Referência, respectivamente, mostrando-se bem mais elástico, o que é uma vantagem de seu emprego em construções civis em locais sujeitos a abalos sísmicos, por exemplo.

- Compressão de 80 % do Valor de Ruptura:

- No tocante a compressão de 80 % do valor de ruptura aplicada aos corpos de prova o composto de granulado PP 25 %, vide Tabela 4.2, continua tendo o melhor desempenho em termos de elasticidade, sendo agora o corpo de prova constituído de PEAD 50 %, 10,01 Mpa, o terceiro de melhor desempenho, porém bem próximo do resultado do Concreto de Referência, 10,33 Mpa, o segundo melhor desempenho o que não era de se esperar levando em consideração os resultados anteriores.

- Compressão de 100 % do Valor de Ruptura:

- Finalmente a análise dos corpos de prova quando submetidos a 100 % do valor de ruptura o Concreto de Referência teve o melhor resultado 21,33 Mpa, seguido

do corpo de prova constituído do granulado PP 25 % 18,08 Mpa, com os demais tendo agora um resultado pífio de 6,14 Mpa e 9,65 Mpa, respectivamente para os corpos de prova compostos por PEAD 25 % e PEAD 50 %.

5.2 - Conclusões sobre os ensaios neutrongráficos:

1. Diante do exposto, pode-se afirmar que o concreto especial, contendo 25 % de granulados de PP, enquadrou-se na categoria de concreto estrutural, sendo os demais classificados como concreto destinado a outras aplicações na Engenharia Civil, tais como, revestimento e pisos. NBR 12655/96.
2. Observa-se também que os corpos de prova que utiliza o granulado PEAD, melhoram seu desempenho quando é aumentada a quantidade desse material de 25% para 50%.
3. Uma vantagem observada dos concretos especiais analisados, em relação ao Concreto de Referência, foi a de serem mais leves. O emprego deles em obras civis não aumentaria a carga sobre a área de construção.
4. Apesar do conteúdo de material plástico (PP e PEAD), portanto, das diferentes concentrações de hidrogênio nas amostras ensaiadas, a técnica mostrou-se eficaz, no que concerne a visualização das microfissuras.
5. Em relação aos demais corpos de prova, os ensaios neutrongráficos mostraram que o comportamento foi semelhante, ou seja, o número de microfissuras aumentou quando se aumentou a carga de compressão Tabelas 4.9, 4.14 e 4.19.
6. Em relação à largura média das microfissuras, observou-se que elas também se alargavam ao se aumentar a carga de compressão. Considerando-se as larguras das microfissuras assinaladas nas figuras 4.8 à 4.19.
7. A variação relativa entre os valores máximos e o mínimo das larguras das microfissuras era pequena como se demonstraram as imagens neutrongráficas apresentadas nas figuras 4.8 a 4.19.

8. As larguras das microfissuras tendem a crescer quando uma ou mais microfissuras concorrem em um ponto, sendo aí um ponto onde pode haver um colapso na estrutura.

5.3 – Sugestões:

1. É interessante que se repita todo o processo de manufatura e ensaios sobre corpos de prova contendo PEAD, a uma proporção maior que a utilizada, como 75 % do material em substituição a areia grossa com o intuito de verificar se o comportamento do mesmo de melhora do desempenho se confirma.
2. Como todos os corpos de prova foram classificados como concreto de estrutura, em especial a mistura contendo PP 25%, possuem plástico em suas respectivas misturas (material hidrogenado) e sabidamente espalhador de nêutrons, é interessante que se faça uma análise da transmissão de nêutrons nesses materiais, com o intuito de utilizar estes materiais como proteção a radiação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ADERHOLD, H.C. The Cornell Neutron Radiography Facility and Its Applications to the Study of the Internal Structure and Microcracking of Concrete. In: Proceedings of the Second World Conference on Neutron Radiography, pp. 321, Paris, France, 1996.

AGUILAR, M.T.P. Análise da Capacidade de Deformação do Concreto. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos materiais. Foz do Iguaçu, PR, 2000.

ANDREUCCI, R. Radiologia Industrial, Ensaios Não Destrutivos das Radiações Ionizantes. ABEND / SP, São Paulo, 2003.

ASTM E 545-05, Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiography Examination, Philadelphia, U.S.A., July, 1991.

BARBOSA, A. L. N. Desenvolvimento de uma Tela Cintiladora Nacional Conversora de Nêutrons, PEN/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

BARTON, J. P, International Neutron Radiography-Past and Future In: Proceedings of the Fifth World Conference on Neutron Radiography, pp 17, Berlin, Germany, 1996.

BRENIZER, J.S. The Use of Contrast Agent in Neutron Radiography Measurements In: Proceedings of the Fifth World Conference on Neutron Radiography, pp 33, Berlin, Germany, 1996.

CRISPIM, V.R. Distribuição de Fluxo de Nêutrons em um Meio Finito por Fonte Rápida, Tese de M.Sc, PEN /COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, junho, 1975.

CRISPIM, V. R. Desenvolvimento de Ensaios Não-Destrutivos com Neutronografias, Tese de Doutorado, PEN/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.

CRISPIM, V. R. & SILVA, J. J. G. Inspeções Não-Destrutivas com Neutronografia Térmica, Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 11, ano 1, 1996.

DA SILVA, A.X. et all. Neutrongrafia Aplicada no Controle ao Narcotráfico e ao Terrorismo, Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 14, ano 1, 1999.

DAWEI, MO. The Application of Neutron Radiography for the Measurement of the Water-Permeability of Concrete. In: Proceedings of the Second World Conference on Neutron Radiography, pp.255, France, June, 1986.

DOMANUS, J.C. Topics for International Standardization in the Field of Neutron Radiography, pp 653, In: Proceedings of the Fourth World Conference, S. Francisco, U.S.A., 1992.

DOMANUS, J. C. Practical Neutron Radiography, Commission of the European Communities Neutron Radiography, Working Group, Kluwer Academic Publishers, 1^a ed, 1992.

FERREIRA, F.J.O. Estudo para Implementação de um sistema eletrônico para Aquisição de Imagens Neutronográficas no Reator Argonauta. Tese de Doutorado, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

FISCHER, C. O. The History of the First Neutron Radiography in Berlin 1935-1944, In: Proceedings of the Fourth World Conference on Neutron Radiography, pp 3, California, U.S.A., 1992.

FUGA, R. Neutrongrafia no Reator IEA-RI, IPEN, março, 1984.

GOMES, C. A. Estudos de Garrafas PET Incorporadas a Blocos de Concreto: Aplicação Alternativa na Construção, XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 2003.

GRIFFITHS, D. J. Introduction to Electrodynamics, 1999

HASKINS, J. J. et al. Neutron Radiography Standards in the United States of America. In: Proceedings of the First World Conference on Neutron Radiography, pp 985, Berlin, Germany, 1996.

IKEDA, Y, et al. An Evaluation of Neutron Radiography for Non-Destructive Testing of Defects. In: Proceedings of the Third World Conference pp.305, Osaka, Japan, May, 1998.

LAMARSH, J. R. Introduction to Nuclear Reactor Teory, Addison- Wesley, 1978.

LIMA, C. T. dos S. Tela Cintiladora de Gadolíneo para Nêutrons, Tese MSc, PEN/ COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

KNOLL, G. F. Radiation Detection Measurement, J. Willey and. Sons, New York, U.S.A.,1979.

KOK, K. D. Evolution of New Beans Using Geometrical Optical, American Nuclear Society, pp. 526, 1971.

LOPES, A. P, et al. Neutron Computed Tomography in Compacted Soil. In: Proceedings of the Fifth World Conference, pp. 734, Berlin, Germany, 1996.

MAST, H.U. et al. A Comparison of Ray-X and Thermal Neutron Radiography. In: Proceedings of the Third World Conference, pp 797, Osaka, Japan, May, 1998.

MENEZES, M.O. Radiografia com Nêutrons em Tempo Real, Tese de Doutorado, IPEN/ CNEN/ USP, São Paulo, 2000.

PESSOA, R. M. Estudo de Resolução em Neutrongrafia com nêutrons térmicos, Tese de MSc, PEN/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1980.

PINHEIRO, R. L. N. Neutrongrafia Aplicada ao Dimensionamento de Objetos Cilíndricos, Tese de MSc, PEN/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1979.

RESENDE, F. M. Influência de Raspas de Borracha de Pneus e de Fibras de Aço no Amortecimento do Concreto, Exame de Qualificação Acadêmica para Doutorado, PEC/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

RODRIGUES, E. Materiais e Técnicas de Construções – IT 461 -T 01. UFRRJ, Dep. de Arquitetura e Urbanismo, Rio de Janeiro, 2003.

ROGERS, J. D. Neutron radiography in Brazil. In: Proceedings of the First World Conference pp 93, J. D., S. Diego, USA, 1981.

SANTOS, J. E. S. C. Neutronografia com Nêutrons Térmicos, Dissertação MSc, PEN/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro , 1977.

SILVA, J. J. G. Detecção de Microdefeitos por Neutronografia Térmica, Dissertação MSc, IME, Rio de Janeiro, 1995.

SIMÃO, F. R. A. Estudo da Colisão de Nêutrons com o Hidrogênio, PEN/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1969.

STADE, J. The Use of Neutron Radiography for Some Problems in Civil Engineering. In: Proceedings of the Third World Conference, pp 653, Osaka, Japan, May 1998.

STEICHELE, E. A Conically Divergent Guide Tube as a Collimator for Neutron Radiography. In: Proceedings of the Fourth World Conference, S. Francisco, U.S.A., 1992.

TAUHATA, L. et all. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 3^a revisão, Rio de Janeiro, 2001.

VOI, D. L. Estudo da Estabilidade e Dinâmica Molecular da Baquetele, através de Medidas das Seções de Choque para Nêutrons. Tese de D. Sc. PEN/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.

WACHA, R. Detecção de Partículas Virais pela Técnica Neutronográfica, Tese de Doutorado, PEN/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

APÊNDICE A:

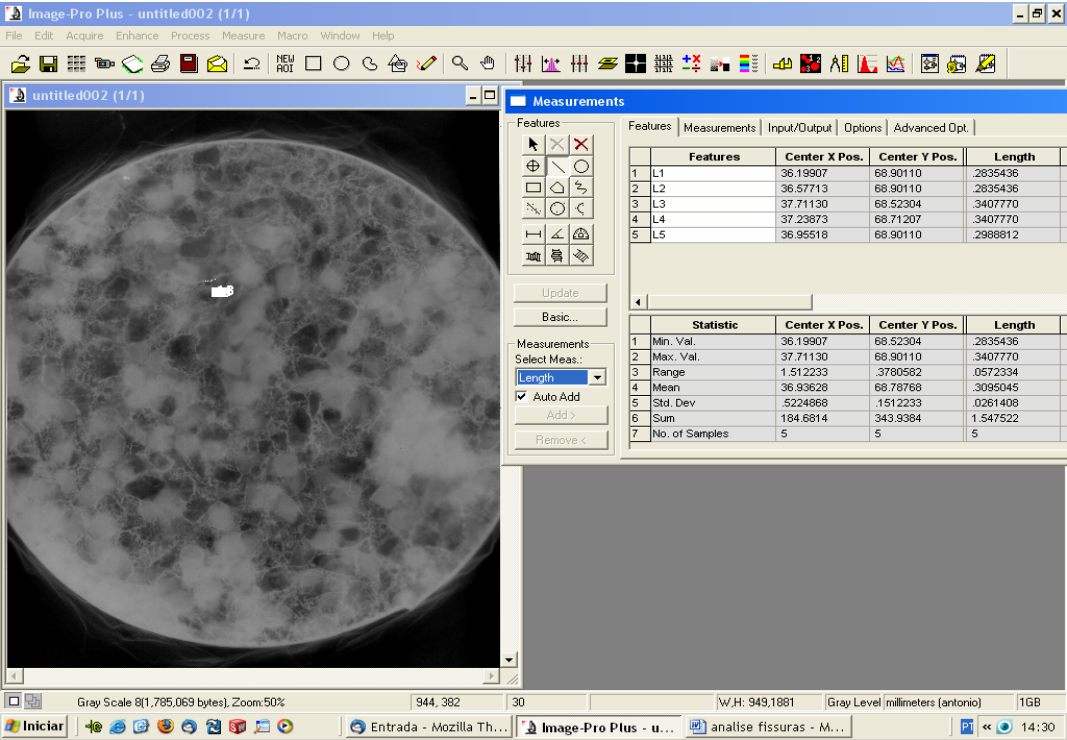


Figura A.1: Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PEAD, após compressão de 60 % do valor de ruptura.

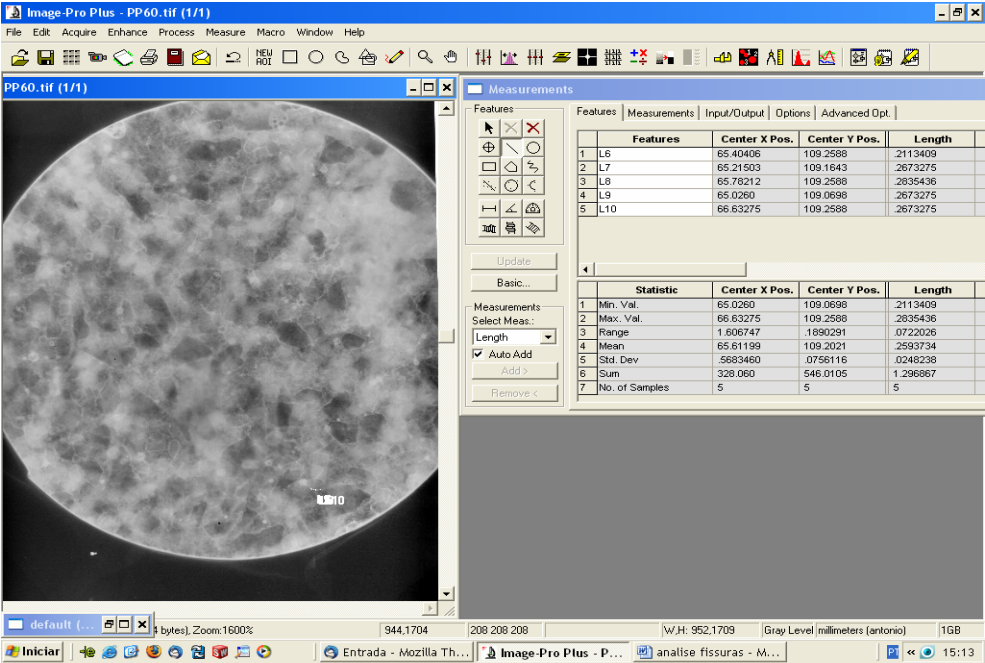


Figura A.2: Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PP, após compressão de 60 % do valor de ruptura.

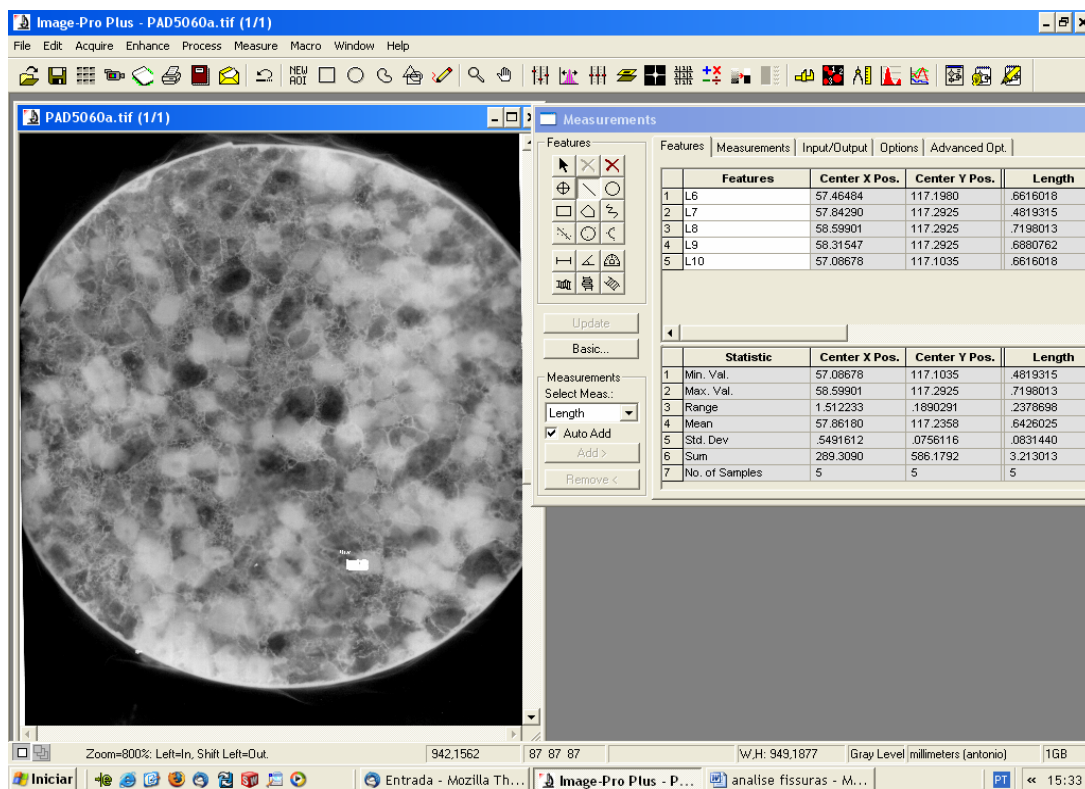


Figura A.3: Imagem neutrongráfica do C P com 50% de PEAD, após compressão de 60 % do valor de ruptura.

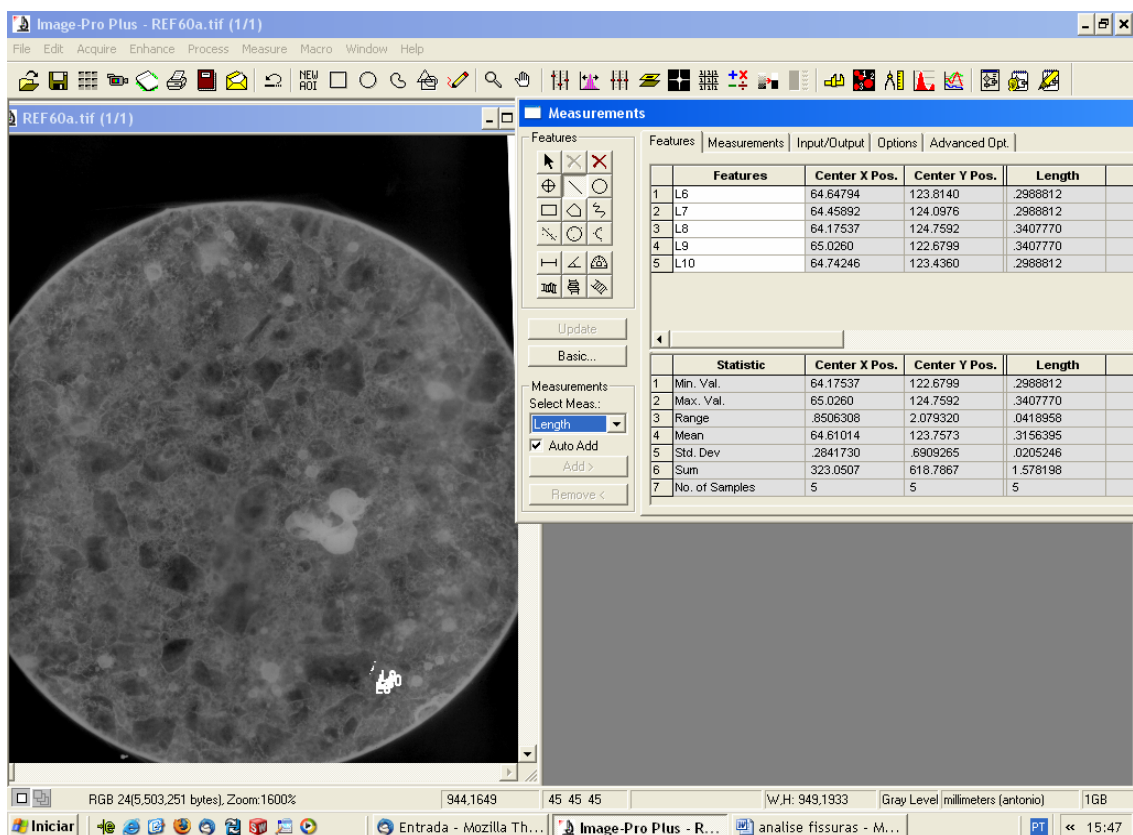


Figura A.4: Imagem neutrongráfica do C P concreto de referência, após compressão de 60 % do valor de ruptura.

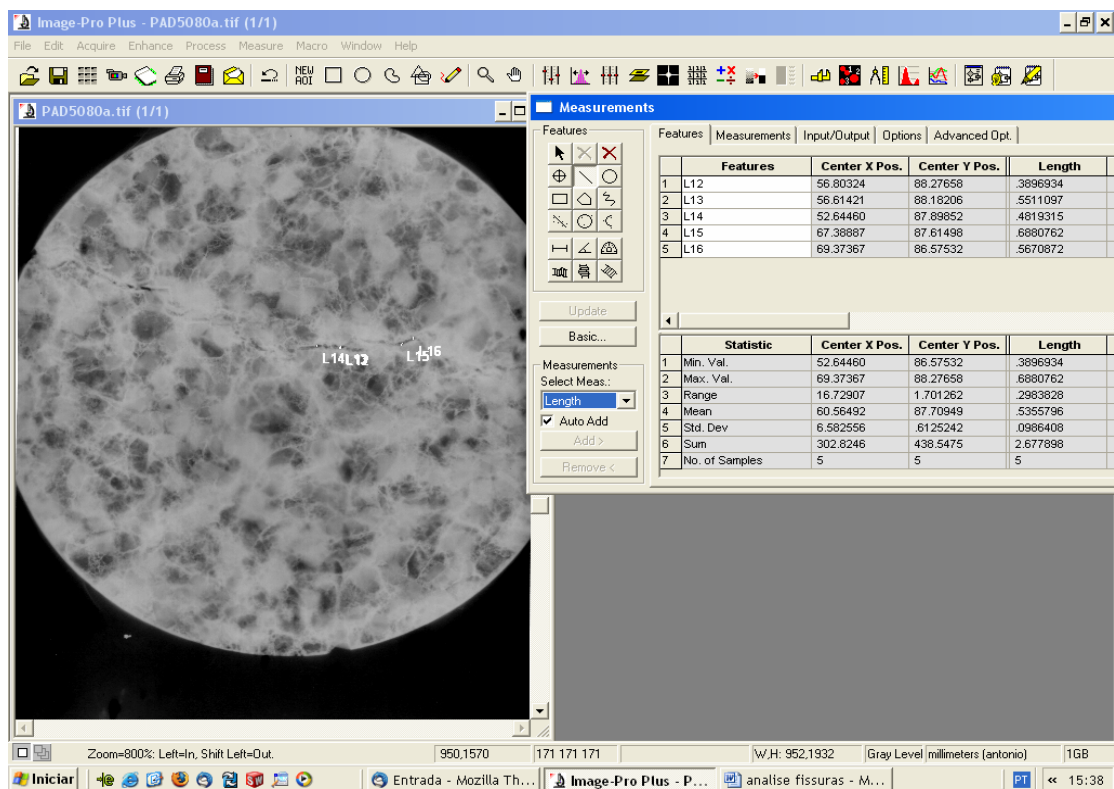


Figura A.5: Imagem neutrongráfica do C P com 50% de PEAD, após compressão de 80% do valor de ruptura.

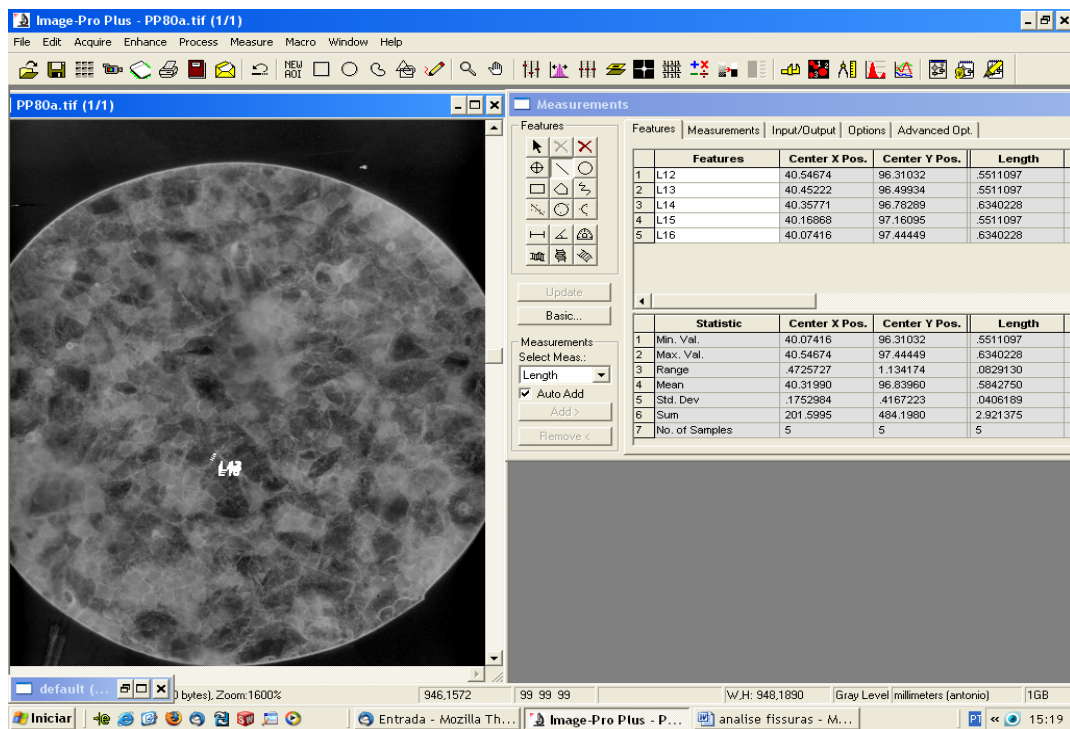


Figura A.6: Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PP, após compressão de 80 % do valor de ruptura

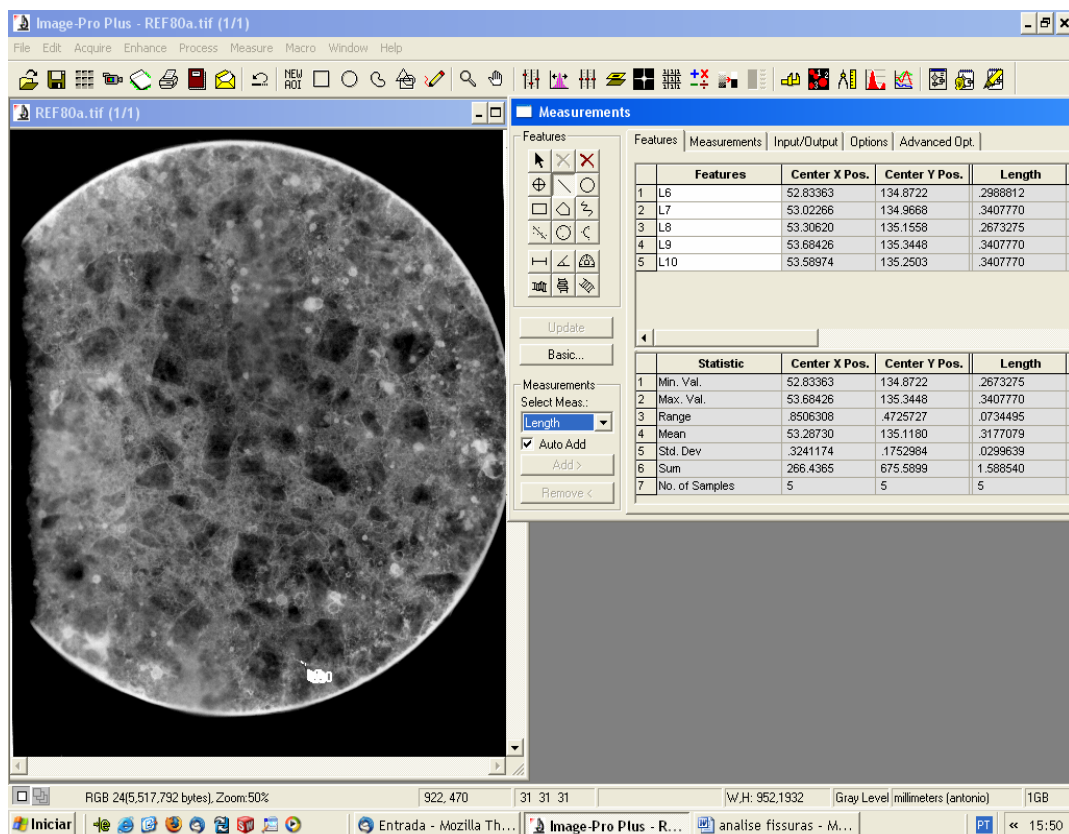


Figura A.7: Imagem neutrográfica do C P concreto de referência, após compressão de 80 % do valor de ruptura

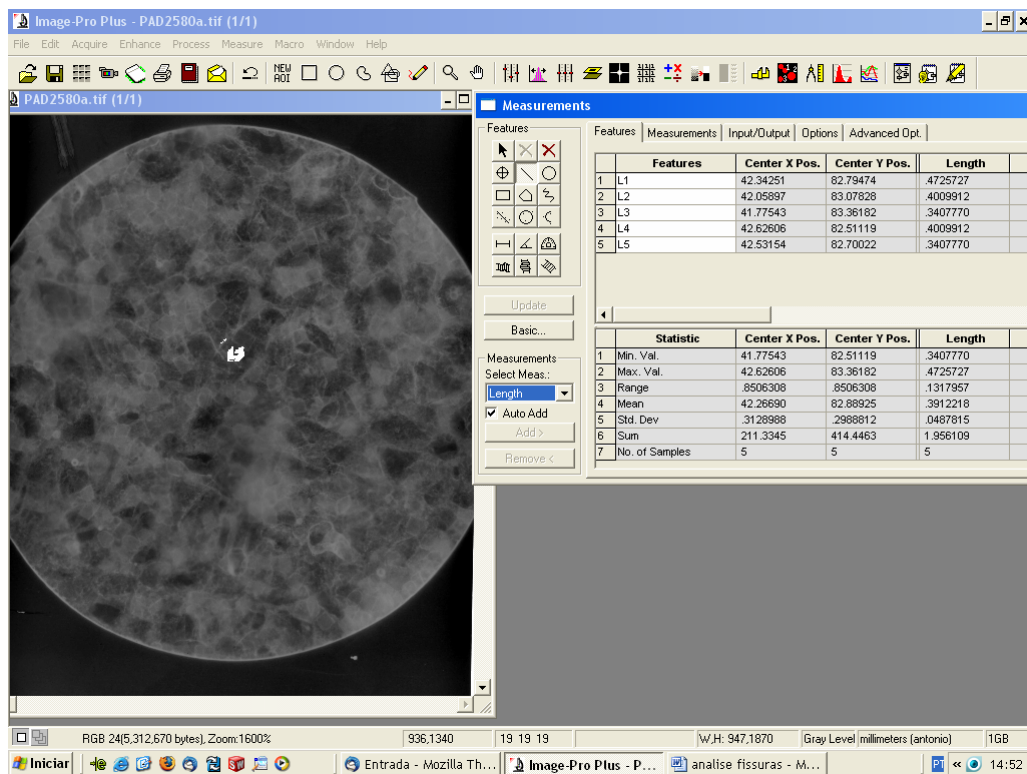


Figura A.8: Imagem neutrográfica do C P com 25% de PEAD, após compressão de 80 % do valor de ruptura.

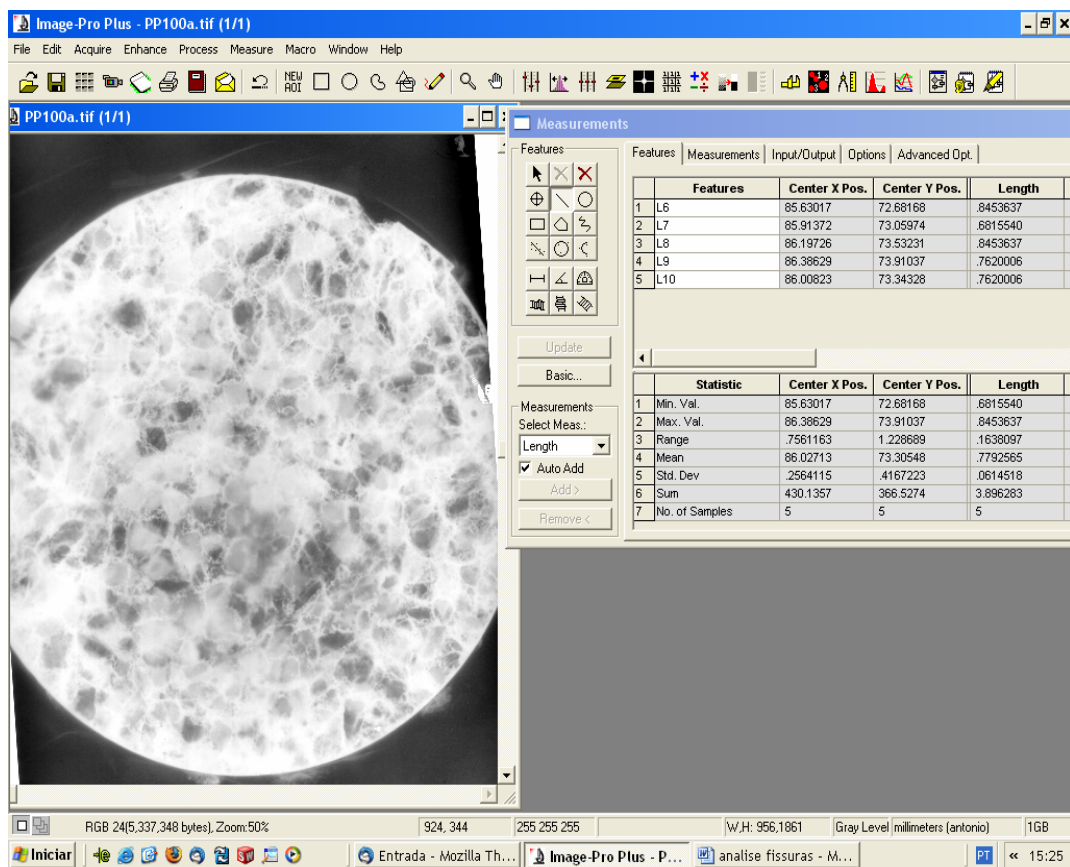


Figura A.9: Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PP, após compressão de 100 % do valor de ruptura

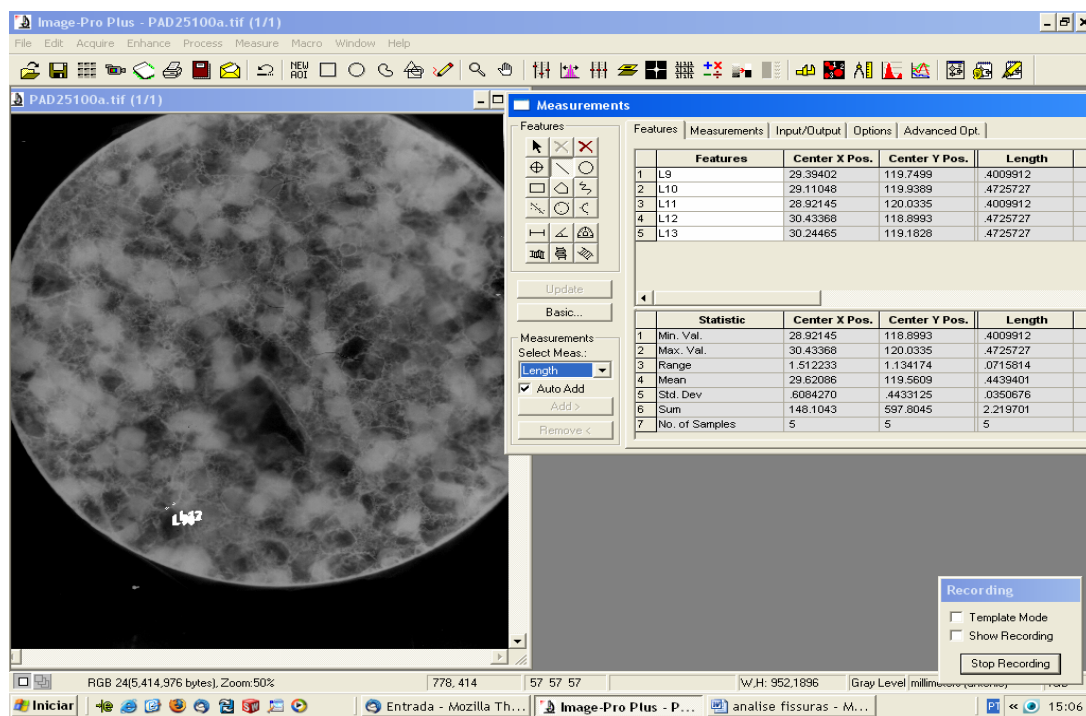


Figura A.10: Imagem neutrongráfica do C P com 25% de PEAD, após compressão de 100 % do valor de ruptura

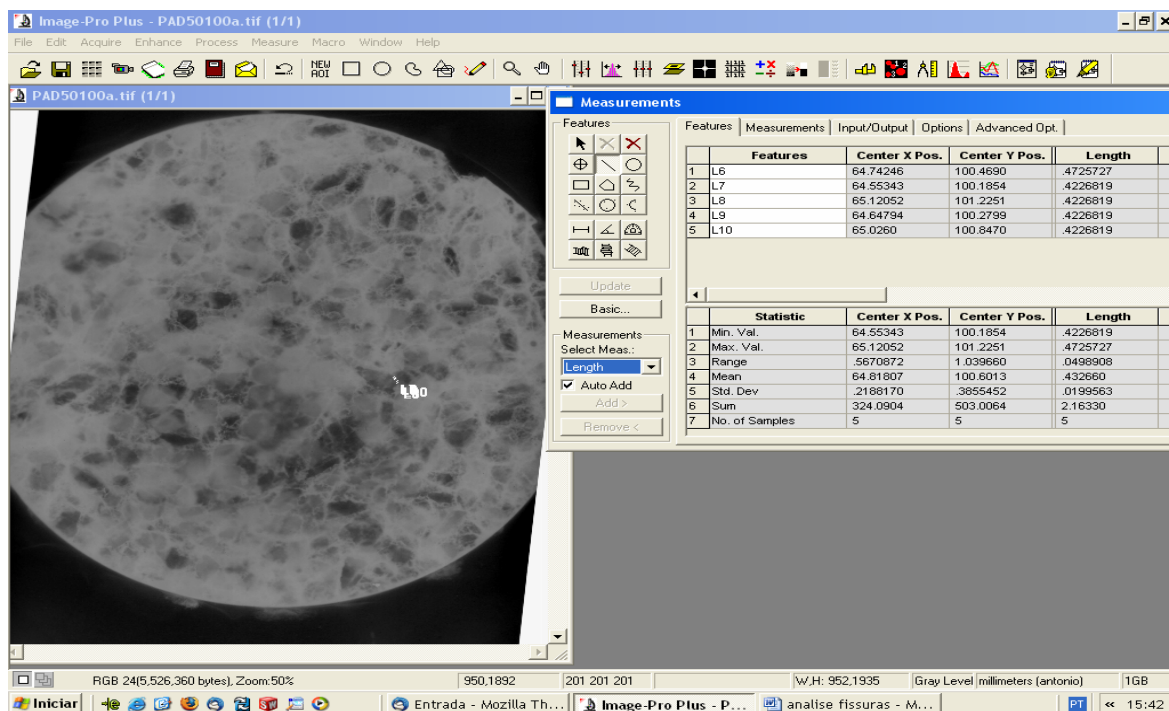


Figura A.11: Imagem neutrongráfica do C P com 50% de PEAD, após compressão de 100 % do valor de ruptura.

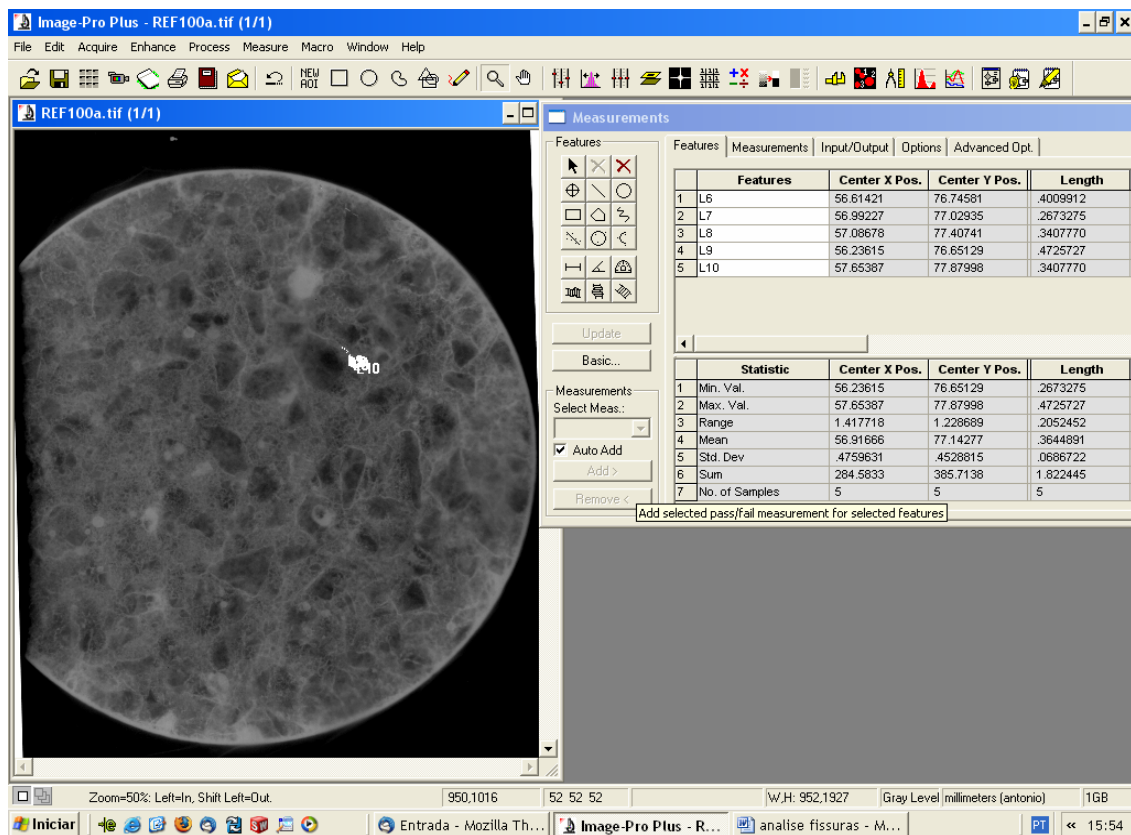


Figura A.12: Imagem neutrongráfica do C.P, concreto de referência, após compressão de 100 % do valor de ruptura.

