

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS
MATERIAIS - PPGEMM

**CARACTERIZAÇÃO DA TENACIDADE DE MATERIAIS
CERÂMICOS DE PEQUENAS DIMENSÕES**

por

Vilson João Batista

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia UFRGS,
dentro do programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais
PPGEMM

Porto Alegre - 1993

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

**CARACTERIZAÇÃO DA TENACIDADE DE MATERIAIS CERÂMICOS DE PEQUENAS
DIMENSÕES**

DISSERTAÇÃO

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos
Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

por

VILSON JOÃO BATISTA - Engenheiro Mecânico

1993

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Ciência dos Materiais, aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-graduação.

Orientador: Telmo Roberto Strohaecker

Doutor em Engenharia

UFRGS - PPGEMM

Banca Examinadora:

Aloísio Nelmo Klein

Dr. Ing.

UFSC - PPGEM

João Alziro Herz da Jornada

Doutor em Física

UFRGS - PPGEMM

Milton Antônio Zaro

Doutor em Engenharia

UFRGS - PROMEC

Coordenador do PPGEMM

Carlos H. Sampaio

Doutor em Engenharia

TENHO COMO TEMPLO O UNIVERSO;
COMO PRECE O TRABALHO;
COMO FÉ O AMOR;
COMO RELIGIÃO A VERDADEIRA AMIZADE.

Agradecimentos

A meu Pai "in memória".

À minha família pelo apoio e compreensão.

À Patrícia pelo imenso carinho e companheirismo.

À Jacqueline pelo horizonte mostrado.

A Telmo Roberto Strohaecker pela eficiente orientação e pelo imenso auxílio sobretudo, com microscopia eletrônica de varredura e pelas sugestões recebidas.

A João Alziro Herz da Jornada cujo boa vontade foram fundamentais para a execução deste trabalho.

Aos colegas e Professores do DEMEC/DEMET, Milton, Rosa, Joyson, Gerbase, Perondi e ao Eng. Carlos A. K. Thomas pelo apoio e camaradagem e à Susi pela presteza das fotografias.

Aos bolsistas, especialmente a Enga. Lenira B. Klein, Predi, Reguly, Juan Carlos e Jaime bem como a todas as pessoas que me auxiliaram direta ou indiretamente na execução deste trabalho, meus agradecimentos.

Ao LABMAT - UFSC, na pessoa do Prof. Dr. Ing. Aloísio Nelmo Klein.

À FAPERGS, pelo apoio financeiro no início deste trabalho.

Resumo

A caracterização das propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos em geral, sob o ponto de vista do controle de qualidade, após a obtenção destes é um fator de extrema importância dentro do processo produtivo. Devido a sua fragilidade, pela alta sensibilidade a defeitos microestruturais, como porosidade e outros, todos os componentes fabricados com materiais cerâmicos são projetados de forma que em serviço estejam solicitados predominantemente a tensões de compressão. Visto que o projeto nem sempre consegue eliminar as tensões de tração, esta passa a ter um papel destacado nos componentes cerâmicos utilizados na engenharia.

Assim, a determinação das propriedades mecânicas de tração em materiais considerados frágeis passa a ser de extrema relevância, apesar de ser, uma tarefa de difícil execução. Entretanto, o ensaio de tração convencional não é recomendado devido às dificuldades inerentes com os materiais de baixa tenacidade. Tradicionalmente, utiliza-se o ensaio de ruptura transversal, para a determinação da tenacidade de materiais cerâmicos, conforme as normas ASTM B-406-76 e ISO 3327-75. No entanto, estes ensaios apresentam uma grande dificuldade na preparação dos corpos de prova, além de exigirem uma razoável quantidade de material.

Neste sentido, é proposto neste trabalho, que a caracterização da tenacidade de materiais cerâmicos seja obtida através do ensaio de compressão diametral - o "TESTE BRASILEIRO", [Ca 37]. Este ensaio é embasado em Norma Brasileira - a ABNT MB-212-1958 e NBR 7222-1983, ambas utilizadas para a determinação da resistência à tração de argamassas e concretos.

Abstract

The characterization of mechanical properties of ceramic materials, from quality control point of view is a factor of extreme importance, once the ceramic product is obtained. Due to its high brittleness from high sensitivity to microstructural defects, as voids and others, ceramic materials parts are designed to be loaded in service with compression stresses. As the design can not always guarantees the absence of tension stresses, these become a major issue in the selection of ceramic materials.

The determination of mechanical properties in tension of brittle materials, necessary in this case, is a rather difficulty procedure. The tension test is not useful due to it's inherent difficulties with low ductility materials. The "transverse rupture" test have been used traditionally with ceramic materials, according to ASTM B-406-76 and ISO 3327-75. These tests however presentes difficulties in the preparation of test specimes and demand a large amount of material.

This work proposes the use of diametral compression test (the Brazilian test) to the characterization of ceramic materials tenacity. The test takes its grounds from the ABNT-MB-212 - 1958 and NBR 7222 - 1983, both recomendaded for tension testing of mortar and concrete blocks.

Índice

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	7
MATERIAIS CERÂMICOS	7
2.1 INTRODUÇÃO	7
2.2 O ESTADO DA ARTE	8
2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MATERIAIS CERÂMICOS	11
2.4 CERÂMICAS COM MAIOR RESISTÊNCIA	13
2.5 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS	14
CAPÍTULO 3	17
MATERIAIS CERÂMICOS ESTUDADOS	17
3.1 INTRODUÇÃO	17
3.2 METAIS DUROS	20
3.3 ALUMINA - Al_2O_3	22
3.3.1 ALUMINA COM CARBETO DE TUNGSTÊNIO (Al_2O_3 -WC)	23
3.3.2 CERÂMICA DE ALTA ALUMINA (90%- Al_2O_3)	24
3.4 NITRETO DE SILÍCIO Si_3N_4	26

CAPÍTULO 4	28
CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS CERÂMICOS	28
4.1 INTRODUÇÃO	28
4.2 DUREZA	30
4.3 TENACIDADE	31
4.4 ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS	34
4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	36
4.5.1 VANTAGENS, NORMALIZAÇÃO	42
4.5.2 ALINHAMENTO, DISPOSITIVO (Bigorna de Bridgman)	43
4.5.3 TENSÕES DE CONTATO	44
4.5.4 EQUAÇÕES	49
CAPÍTULO 5	52
METODOLOGIA EXPERIMENTAL	52
5.1 INTRODUÇÃO	52
5.2 USINAGEM DOS MATERIAIS CERÂMICOS	53
5.2.1 CORTE	54
5.2.2 EMBUTIMENTO	56
5.2.3 MÁQUINA DE CORTE, DESBASTE E POLIMENTO	58
5.2.4 POLIMENTO	59
5.3 ENSAIOS	61
5.3.1 ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS	61
5.3.2 INDENTAÇÕES	65

5.3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	65
5.4 ANÁLISE DE TENSÕES - Via Método de Elementos Finitos	66
CAPÍTULO 6	68
RESULTADOS	68
6.1 INTRODUÇÃO	68
6.2 POLIMENTO	70
6.3 CERAMOGRAFIA	70
6.4 INDENTAÇÕES	76
6.5 ENSAIOS DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS	78
6.6 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	79
6.6.1 METAL DURO (WC - Co)	88
6.6.2 Si ₃ N ₄ - NITRETO DE SILÍCIO	99
6.6.3 ALUMINA Com Carbetto de Tungstênio (Al ₂ O ₃ - WC)	102
6.6.4 CERÂMICA DE ALTA ALUMINA (90% - Al ₂ O ₃)	104
6.7 PREPARAÇÃO DOS MODELOS PARA ANÁLISE DE TENSÕES	
NOS MÉTODOS: Flexão a Três Pontos e Compressão Diametral	108
6.7.1 FLEXÃO A TRÊS PONTOS - Preparação do Modelo	108
6.7.2 COMPRESSÃO DIAMETRAL - Preparação dos Modelos	114

CAPÍTULO 7	125
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	125
7.1 INTRODUÇÃO	125
7.2 METAL DURO (WC- Co)	127
7.2.1 METAL DURO - CLASSE HF	128
7.2.2 METAL DURO - CLASSE NHA	129
7.2.3 METAL DURO - CLASSE HA	130
7.2.4 METAL DURO - CLASSE MPD2	130
7.3 Si ₃ N ₄ - NITRETO DE SILÍCIO	131
7.4 ALUMINA Com Carbetto de Tungstênio (Al ₂ O ₃ - WC)	132
7.5 CERÂMICA DE ALTA ALUMINA (90% - Al ₂ O ₃)	133
7.6 ANÁLISE DE TENSÕES - Via Método de Elementos Finitos	134
7.6.1 FLEXÃO A TRÊS PONTOS - ANÁLISE DE TENSÕES	134
7.6.2 COMPRESSÃO DIAMETRAL - ANÁLISE DE TENSÕES	135
CAPÍTULO 8	141
CONCLUSÕES	141
SUGESTÕES	144
APÊNDICE	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
NORMAS TÉCNICAS CONSULTADAS	156

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em alguns campos de atividades tecnológicas, tais como as indústrias aeroespaciais, nuclear e eletrônica, atinge-se determinados obstáculos que somente podem ser superados pelo desenvolvimento de "novos materiais". Assim, com o advento dos "novos materiais" e principalmente, face ao rápido e crescente índice de aplicação dos materiais cerâmicos utilizados em engenharia, há uma exigência tecnológica imediata para otimizar a caracterização de propriedades mecânicas durante o processo de desenvolvimento destes. Com isso, o controle de produção pode ser realizado também através de ensaios mecânicos e o aperfeiçoamento de um material em desenvolvimento pode ser estudado pela caracterização de suas propriedades mecânicas para garantir a qualidade final do produto. Com esse desfecho, são sistematizados os chamados ensaios de rotina

utilizados pelos controles de qualidade das empresas quando do recebimento de materiais e/ou da expedição de seus produtos.

A determinação das propriedades mecânicas de um material qualquer tem sido realizada por meio de vários ensaios. Esses ensaios geralmente são destrutivos, pois promovem a ruptura do material. Na categoria dos ensaios destrutivos, estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. O ensaio de dureza que, embora possa, em certos casos, não inutilizar a peça ensalada, também está incluído nessa categoria. De um modo geral a escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada tipo de produto depende da finalidade do material, dos tipos de esforços que esse material vai sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja obter.

Dois fatores determinantes para a realização de um dado tipo de ensaio mecânico são a **quantidade** e o **tamanho** das amostras a serem testadas. Os resultados de alguns dos ensaios citados permitem obter dados numéricos que podem ser utilizados no cálculo das tensões de trabalho e até no projeto de uma peça. Outros, porém, fornecem apenas resultados comparativos ou qualitativos do material e servem como informação orientativa para auxiliar ou completar especificações de um estudo ou de um projeto.

Tradicionalmente, para caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos, é utilizado o ensaio de ruptura transversal mediante o teste de flexão a três ou quatro pontos. Observamos, entretanto, que para a realização destes testes existe uma dificuldade relativa. Pois, os corpos de prova são confeccionados com geometria prismática e seção retangular necessitando que

quatro das suas seis faces tenham paralelismo na ordem de centésimos de milímetros além de um ótimo acabamento superficial. Estas quatro faces estão localizadas no sentido longitudinal do corpo de prova.

Outro aspecto que nos parece de extrema relevância, quando se trata principalmente dos novos materiais cerâmicos, é a grande quantidade de material necessário empregado na confecção dos corpos de prova, utilizados para levantamento e caracterização das suas propriedades mecânicas [Po 81].

Atualmente as aplicações dos materiais cerâmicos se fazem presentes maciçamente na indústria de transformação. Na engenharia de processos, utilizando-se de ferramentas para corte em alta velocidade, estas participam na fabricação em grande escala de peças e componentes para a indústria automobilística e outras. Estas ferramentas, por sua vez, são geralmente fornecidas pelos seus fabricantes nas formas de pequenos insertos e pastilhas com geometrias de características diversas, justificando a necessidade real de um método para a caracterização das propriedades mecânicas de peças cerâmicas com pequenas dimensões.

Um outro método bastante interessante que começa a ser empregado para a caracterização das propriedades mecânicas de diversos materiais é o "**Ensaio de Compressão Diametral**". No Brasil, esta técnica, "Ensaio de Compressão Diametral" ou "**TESTE BRASILEIRO**" que é normalizada pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas através das Normas MB-212 de 1958 e NBR-7222 de 1983, é utilizada com exclusividade na área de Engenharia Civil para a determinação de propriedades mecânicas de argamassas e concretos, onde a resistência à tração é obtida de forma indireta.

A interpretação do ensaio de compressão diametral foi baseado no método de um pesquisador brasileiro - Lobo Carneiro [Ca 37], [CA 52], [Ca 53], o qual foi desenvolvido a partir da teoria das tensões de contato de Hertz [He 96]. Este método, ensaio de compressão diametral, apresenta-se como uma boa alternativa de teste para a determinação de propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos em geral, notadamente para peças de pequenas dimensões.

Na pesquisa bibliográfica isto ficou evidente quando, através das publicações especializadas, demonstrou-se que em nível internacional este método, "Ensaio de Compressão Diametral", vem sendo amplamente utilizado no controle de qualidade de produtos em diversas áreas industriais tais como; indústria farmacêutica [Zi 78], caracterização de rochas [Kj 88], carvão coque utilizado como combustível na siderurgia [LW 82], pavimentações de rodovias [AK 72], [Ch 75] e também na caracterização de propriedades mecânicas de materiais orgânicos como espigas de milho, cana de açúcar e outros [SSF 76], dados estes de grande importância para o projeto e dimensionamento de máquinas para a indústria alimentícia assim como máquinas e implementos agrícolas, tendo em vista a crescente necessidade da mecanização e automação do setor industrial primário na produção de alimentos o que é uma das vocações da economia nacional.

O presente trabalho propõe uma contribuição na área de - *caracterização da tenacidade de materiais cerâmicos através de corpos de prova de pequenas dimensões* - utilizando-se do método do "Ensaio de Compressão Diametral" ou o chamado "TESTE BRASILEIRO" [Ch 75].

Diante destas considerações, teve-se neste estudo, alguns objetivos enumerados a seguir:

- Desenvolvimento do projeto e construção de um dispositivo tipo Bigorna de Bridgman, que mantenha o alinhamento axial frente a aplicação do carregamento e proporcione rigidez necessária durante o ensaio, sendo este realizado em uma máquina universal de ensaios - tipo convencional;
- O desenvolvimento de técnicas para a obtenção de corpos de prova de materiais cerâmicos extremamente duros, a partir do domínio da utilização de ferramentas cerâmicas como discos de corte, rebolos de desbaste e polimento, diamantados e/ou de nitreto de boro cúbico - CBN ditos de alta performance;
- Evidenciar a metodologia desenvolvida em comparação aos métodos tradicionais, dada a relativa facilidade do ensaio de compressão diametral propriamente dito e, também, da relativa facilidade de obtenção dos corpos de prova de geometria cilíndrica para a determinação da tenacidade dos materiais cerâmicos;
- Reduzir de forma considerável o volume necessário de um novo material processado - normalmente desenvolvido em laboratório com elevadíssimo custo - tendo em vista a confecção dos corpos de prova para a caracterização de suas propriedades físico/mecânicas.

Nos capítulos iniciais é feita uma revisão dos vários aspectos necessários ao entendimento do estudo desenvolvido. Este esforço se fez necessário tendo em vista que o assunto ensaio de compressão diametral tem sido extensivamente empregado nas áreas de engenharia civil e minas - para a caracterização das propriedades mecânicas em concretos; solos e rochas. Estes materiais são largamente utilizados como elementos estruturais. Entretanto, os corpos de prova especificados e/ou recomendados pelas respectivas Normas, apresentam grandes dimensões se comparados aos ensaios realizados neste trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre a evolução histórica e o estado da arte na utilização dos materiais cerâmicos. No capítulo 3, faz-se uma descrição pormenorizada dos sete tipos de Materiais Cerâmicos utilizados neste estudo, e com as especificações gerais (propriedades físicas/mecânicas) fornecidas pelos diversos fornecedores. No capítulo 4 é dado um destaque especial à área de caracterização de suas propriedades mecânicas. Já no capítulo 5, Metodologia Experimental, aborda-se principalmente o processo de usinagem dos corpos de prova e também são relatadas algumas dificuldades encontradas na sua execução. No capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais dos ensaios de flexão a três pontos e também os ensaios de "compressão diametral", os quais, totalizaram dezesseis lotes dos trezentos testes realizados.

No capítulo 7 são discutidos os resultados com a apresentação de uma análise de tensões das duas técnicas de ensaios utilizadas neste trabalho via Método de Elementos Finitos - FEM do software "Algor Inc.". Finalmente, no capítulo 8 aborda-se as conclusões do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2

MATERIAIS CERÂMICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Genericamente o termo cerâmica vem sendo definido como um "material orgânico não metálico, processado ou consolidado em temperaturas elevadas" [Sa 84]. Ainda que alguns pesquisadores considerem as cerâmicas materiais cristalinos; excluindo o vidro, outros a aceitam sem restrições. Atualmente o termo está definido como cerâmica de alta tecnologia ou de alta performance. Esta tem o seu desenvolvimento a partir de profundo conhecimento científico, processada e controlada por uma engenharia de alto nível. Seu uso na engenharia vem progressivamente aumentando, devido a algumas vantagens

sobre os metais.

Uma das limitações das cerâmicas é quanto a fragilidade; ou seja, elas se rompem drasticamente após sofrerem pequena ou nenhuma deformação plástica. Esta característica é consequência da concentração de tensões no entorno de defeitos e de sua inabilidade de eliminar tais tensões por deformação plástica.

Assim, a resistência à fratura dos materiais cerâmicos é resultante da presença de falhas estruturais (trincas, poros, etc.), e do grau de dificuldade imposto pelo material para a propagação dessas falhas. Portanto, para que se possa utilizar as propriedades positivas dos materiais cerâmicos, torna-se necessário diminuir o tamanho das falhas e/ou aumentar a resistência à sua propagação. Dentro de uma variada gama de compostos que fazem parte dos materiais cerâmicos, com aplicação industrial podemos citar como exemplo: os carbonetos, nitretos, óxidos, silicatos e sulfetos [Du 88].

2.2 O ESTADO DA ARTE

Ao longo da história da humanidade a cerâmica vem sendo utilizada para a produção de potes, jarros e tijolos. Esses materiais vinham sistematicamente sendo rejeitados para certas aplicações em engenharia devido ao seu comportamento crítico quando submetidos a carregamentos de impacto. De fato, a fragilidade continua sendo o grande problema da maioria dos materiais cerâmicos frente às sollicitações mecânicas. Por essa razão, os metais têm se

mantido soberanos nessa área - eles apresentam elevada resistência mecânica, tenacidade, maleabilidade e também dentro de certos limites, resistência em elevadas temperaturas. Permitem com isso a confecção de peças com excelente reprodutibilidade de propriedades atendendo às necessidades de inúmeras aplicações em engenharia.

Hoje, com a evolução do conhecimento científico na área de materiais e o consequente aperfeiçoamento dos processos, temos como resultado diversas cerâmicas, ditas de alta tecnologia, que superam os metais em algumas aplicações de engenharia. É difícil precisar quando as cerâmicas de alta tecnologia apareceram no cenário industrial. A bibliografia cita que uma das primeiras cerâmicas a ser produzida foi o carbetto de silício, introduzido pela Carborundum Co. na década de 90 no século passado. Após isso, as pesquisas nesta área, voltaram a ter um grande impulso durante a Segunda Guerra Mundial, devido ao interesse no desenvolvimento das cerâmicas de alta performance principalmente quanto às suas propriedades elétricas e resistência ao calor para aplicações na indústria bélica.

Nos anos pós-guerra, com o desenvolvimento de poderosas técnicas analíticas e o crescente aperfeiçoamento computacional assim como os equipamentos eletrônicos, as propriedades elétricas e magnéticas das cerâmicas foram amplamente pesquisadas para a fabricação de componentes eletrônicos como: ímãs, núcleos de ferrite, capacitores, substratos de circuitos integrados, termistores entre outros. Nas últimas duas décadas as cerâmicas vêm sendo mais profundamente estudadas com relação às suas propriedades mecânicas. Esse interesse teve seu início, principalmente, no desenvolvimento de novos projetos de motores de combustão interna para fins automotivos, palhetas de turbinas a gás mais eficientes e componentes de foguete.

Outro fator motivador é no que tange as ferramentas para corte de alta velocidade que são de extrema importância dentro dos processos de manufatura industrial [Pa 91]. Hoje a informática permite o uso generalizado de centros de usinagem para alta produtividade que esbarram nas limitações de ferramentas tradicionais. Assim, foi até natural o desenvolvimento de cerâmicas para ferramentas de corte. Elas permitem um elevado rendimento ao processo de fabricação por usinagem estabelecendo, com isso, efetivamente a automação da manufatura industrial.

Apresentamos na tabela 2.1, alguns materiais com seus pontos de fusão e sublimação, os quais, vêm sendo progressivamente adaptados em diversas aplicações de engenharia como componentes eletrônicos, mecânicos, ferramentas para corte de alta velocidade e outros.

Tabela 2.1 - Pontos de fusão e sublimação de alguns materiais de engenharia [BBR+ 84].

Materiais de Engenharia		Tf ou Ts
Alumina	Al ₂ O ₃	2054 °C
Magnésia	MgO	2800 °C
Zircônia	ZrO ₂	2770 °C
Carbeto de Boro	B ₄ C	2450 °C
Carbeto de Silício	SiC	2650 °C
Nitreto de Boro	BN	3000 °C (s)
Nitreto de Silício	Si ₃ N ₄	1900 °C (s)
Nitreto de Titânio	TiN	2950 °C
Siliceto de Molibdênio	MoSi ₂	2030 °C
Ferro	Fe	1535 °C
Níquel	Ni	1453 °C
Alumínio	Al	660 °C

2.2.1 ALGUMAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MATERIAIS CERÂMICOS

Além da capacidade de resistência a altas temperaturas, as cerâmicas de alta tecnologia apresentam diversas vantagens sobre os metais como:

- Dureza são as mais duras substâncias conhecidas como, por exemplo: o diamante, o nitreto de boro cúbico, o carbeto de boro e o carbeto de silício.
- Densidade são normalmente mais leves que os metais. Propriedade esta de extrema importância por exemplo na construção de peças para aeronaves, mísseis e aplicações aeroespaciais, onde a redução de peso significa economia de combustível. Os rotores cerâmicos apresentam desempenho significativamente superior aos rotores metálicos, devido à sua baixa inércia e maior estabilidade.
- Geralmente são altamente resistentes à oxidação, ataques químicos e mecânicos, assim como à erosão e à cavitação.
- As cerâmicas são de um modo geral provenientes de matéria prima abundante. Por exemplo, entre os elementos mais comuns usados está o silício, que corresponde a aproximadamente 27% da crosta terrestre.
- Diferentemente do caso da obtenção de superligas para utilização em

altas temperaturas, as cerâmicas não necessitam em sua composição da adição de metais estratégicos e caros.

- As cerâmicas de alta tecnologia são de um modo geral mais baratas que as superligas; entretanto, não tão baratas como se poderia esperar. Isto está associado ao fato de que o silício e o óxido de alumínio, por exemplo, usados na preparação de cerâmicas avançadas, são submetidos a uma série de dispendiosos processos de purificação e refinamento antes de poderem ser usados na produção final. Existem alguns casos porém onde as cerâmicas ainda apresentam custos elevados devido à pequena escala em que são produzidas.
- Por apresentarem baixo coeficiente de atrito, alta resistência à compressão e resistência ao desgaste, algumas cerâmicas são usadas em mancais ou outros componentes mecânicos sem requererem lubrificação podendo, inclusive, operar em altas temperaturas.

Mesmo apresentando todos estes diferenciais persistem restrições no uso de cerâmicas em aplicações estruturais devido à sua fragilidade. Esses materiais, ao contrário dos metais, apresentam ruptura catastrófica quando solicitados a sobrecargas ou submetidos a impacto, caracterizando, assim, sua incapacidade de absorver temporariamente um excesso de energia e, por este motivo, caracterizados como materiais com baixa tenacidade.

Ainda é difícil a reprodutibilidade das propriedades físicas na produção de peças cerâmicas em uma mesma "fornada", o que daria a condição de uniformidade. Estas características são importantes, na medida em que as

propriedades das cerâmicas são muito mais sensíveis a imperfeições do que os metais. Por exemplo, poros nos contornos de grão ou inclusões, podem ser aceitáveis em metais mas não em cerâmicas. Quanto à fabricação, podemos citar as dificuldades na produção de peças de grande porte, assim como as peças com geometria complexa. A usinagem de algumas cerâmicas pode ser de difícil execução, com alto consumo de tempo e elevados custos, devido à sua alta dureza. A união de peças cerâmicas entre si ou com peças metálicas, pode também apresentar alguma dificuldade. E, finalmente, durante a produção podem surgir falhas no material, como pequenas trincas, vazios e outros defeitos não detectados e que, associadas as tensões internas acabam por provocar à fratura da peça [Sa 84].

2.2.2 CERÂMICAS COM MAIOR RESISTÊNCIA

Nos últimos anos um grande incentivo tem sido dado à pesquisa para o desenvolvimento de materiais que possuam maior confiabilidade das suas propriedades mecânicas, basicamente aumentando sua tenacidade. Neste contexto, os materiais cerâmicos vêm desempenhando um papel de crescente relevância na sofisticada tecnologia moderna. Com um vasto espectro de aplicações nos mais diversos setores industriais, alguns materiais cerâmicos apresentam-se como candidatos em potencial para aplicações estruturais como em temperaturas elevadas ($T \geq 1100 \text{ }^\circ\text{C}$) e/ou em ambientes corrosivos em que até mesmo as mais recentes ligas metálicas desenvolvidas não mantêm sua integridade.

De maneira geral, existem dois caminhos a serem seguidos. O primeiro consiste em reduzir o tamanho e a quantidade de falhas e imperfeições das peças produzidas via aperfeiçoamento dos processos. Como exemplo podemos citar o emprego de pós puros e de partículas muito finas e uniformes. Tais partículas podem ser densamente “empacotadas” de maneira ordenada e, quando sinterizadas, produzem cerâmicas com poros muito pequenos e livres de trincas. O segundo se refere a alguns mecanismos específicos para dificultar a propagação de trincas produzindo com isso uma elevação da tenacidade. Dentre eles podem ser citados: o mecanismo de microtrincas controladas, a adição de partículas que sofram transformação martensítica com aumento de volume, e aqueles por adição de fibras, plaquetas ou whiskers, estes últimos ora em desuso por serem um elemento cancerígeno.

2.2.3 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS

A História nos ensina que a evolução dos meios de produção é uma decorrência dos processos de fabricação e do ferramental tecnicamente compatível para cada nível de exigência. Os requisitos solicitados a uma ferramenta de corte de maneira geral são: elevada dureza a frio (sempre superior a da peça trabalhada), elevada dureza a quente, elevada tenacidade para resistir às sobrecargas e impactos, resistência à abrasão, estabilidade química e, finalmente, grande facilidade de obtenção a preços econômicos.

Entretanto, verificamos que nenhuma das ferramentas de corte dos inúmeros materiais utilizados para fabricá-las apresenta todas as qualidades

requeridas. Se por um lado apresentam algumas propriedades superiores, outras são inferiores. Esta compatibilidade que também está associada ao custo da ferramenta, deve atender as exigências principais de cada trabalho específico em detrimento dos parâmetros secundários. As cerâmicas utilizadas como ferramentas de corte não fogem à regra e, para que estas dêem os resultados esperados, há que se otimizar os parâmetros de usinagem através da compatibilização do ferramental versus material trabalhado permitindo que o processo seja técnica e economicamente viável.

Historicamente a evolução tecnológica dos materiais utilizados como ferramentas de corte no processo de usinagem apresentam-se dentro da seguinte cronologia de desenvolvimento [St 89]:

- **Aços ferramenta,**> até 1900 os aços de alto carbono, chamados de "aços ferramentas", eram e continuam sendo utilizados para fabricar as ferramentas de corte. Apresentavam teores de 0,8 a 1,5% de carbono.
- **Aços rápidos comuns,**> sua apresentação pública ocorreu na exposição mundial de Paris em 1900. Seus elementos básicos de ligação são W, Cr e V.
- **Aços rápidos ao cobalto,**> apresentado em 1921, com a adição do Co aos aços rápidos obtem-se uma melhora substancial de propriedades, principalmente na sua dureza a quente.

- **Ligas fundidas,**> data de 1922 a sua apresentação. Constituídas por elevadas porcentagens de W, Cr e Co. Conhecidas pelos nomes comerciais de stellite, tantung, rexaloy, chromalloy e no Brasil como steltan.
- **Carbonetos sinterizados,**> “metal duro”, apresentado em 1927 a empresa alemã F. Krupp, lança o metal duro com o nome comercial de - WIDIA - “Wie Diamant”, (como diamante). Sua composição básica apresenta por exemplo, carbeto de tungstênio e cobalto (WC 87% + Co 13%).
- **Cerâmicas,**> ditas de alta tecnologia, a Carborundum Co. já em 1890 desenvolveu o carbeto de silício. Teve, entretanto, seu desenvolvimento acelerado durante a Segunda Guerra Mundial com a finalidade de aplicação na indústria bélica.
- **Diamantes,**> 1954, data da síntese de diamante policristalino. Sua produção em nível industrial teve início a partir de 1957.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS CERÂMICOS ESTUDADOS

3.1 INTRODUÇÃO

A gama de materiais cerâmicos disponíveis para o desenvolvimento deste trabalho era bastante extensa além de uma diversidade de importantes aplicações industriais. Assim, optamos por cerâmicas classificadas como "funções mecânicas" empregadas na fabricação de ferramentas para corte de alta velocidade utilizadas nos processos de usinagem e também, as cerâmicas ditas de "alta alumina (Al_2O_3)" utilizadas na fabricação de diversos itens como peças e componentes mecânicos, com aplicações principalmente na indústria química onde os itens resistência a corrosão e abrasão são de extrema relevância.

A partir destas definições, estabelecemos contatos com produtores,

fornecedores e representantes de cerâmicas produzidas no Brasil e complementamos este universo com algumas amostras importadas, totalizando sete tipos de materiais cerâmicos a serem estudados e descritos abaixo:

- Quatro classes de metal duro que são: HF, NHA, HA e MPD2 com seus teores crescentes de cobalto - 3,00%, 5,00%, 5,75% e 12,25% - respectivamente, conforme mostra a tabela 3.2.
- Uma alumina-(Al₂O₃ - WC) classificada como ferramenta para corte em alta velocidade utilizada para usinagem de metais diversos, com características apresentadas na tabela 3.3.
- Cerâmica dita de "alta alumina-(90% - Al₂O₃)" e utilizada na fabricação de componentes de máquinas para indústria química devido a sua alta resistência a corrosão e também a abrasão, conforme características apresentadas na tabela 3.4.
- Nitreto de Silício-Si₃N₄ também, utilizado como ferramenta de corte em alta velocidade para usinagem, conforme mostra a tabela 3.5.

Na tabela 3.1, são apresentados os referidos materiais cerâmicos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho, com as suas diversas configurações, procedências e suas aplicações originais. É mostrado também, em função da diversidade de geometrias, uma programação das diversas operações de usinagem a que estas peças foram submetidas para a confecção dos respectivos corpos de prova. Posteriormente, e com lotes de cinco corpos de prova, foram realizados "Ensalos de Flexão a Três Pontos" e "Ensalos de Compressão Diametral" ou "TESTE BRASILEIRO".

MATERIAL	ORIGEM	FORMATO	OPERAÇÕES DE USINAGEM COM REFRIGERAÇÃO				QUANTIDADE	OBSERVAÇÕES	
			CORTE	TORNEAMENTO	FACEAMENTO	POLIMENTO			
CLASSES DE METAL DURO (WC)	HF	BRASSINTER	RNGN 090300					10 PÇ	PEÇAS PRONTAS
	NHA	BRASSINTER	RNGN 120300					10 PÇ	PEÇAS PRONTAS
	"	"	RNGN 120400					10 PÇ	PEÇAS PRONTAS
	HA	BRASSINTER	SC-77/L3	x		x	x	10 PÇ	USINADAS D=5,5mm
	"	"	SC-77/L4	x		x	x	10 PÇ	USINADAS D=5,5mm
	"	"	SC-1212/L3	x		x	x	10 PÇ	USINADAS D=9,5mm
	"	"	SC-1212/L4	x		x	x	10 PÇ	USINADAS D=9,5mm
	MPD 2	BRASSINTER	RNGN 090300					10 PÇ	PEÇAS PRONTAS
Si_3N_4	KENAMETAL	FERRAMENTA	x	D=5,0mm	L=3mm	x		10 PÇ	USINADAS
		PARA USINAGEM	x	D=5,0mm	L=2mm	x		10 PÇ	USINADAS
		KYON 3000							
Al_2O_3	REVOLOX	FERRAMENTA	x	D=6,0mm	L=1,4mm	x		5 PÇ	USINADAS
		PARA USINAGEM							
		TIPO 194							
Al_2O_3	NTK	PISTÃO PARA	x	D=22,5mm	L=6mm	x		6 PÇ	USINADAS
		BOMBA COM	x	D= 6mm	$l_4=3mm$	x		10 PÇ	USINADAS
		$\phi=22,5mm$	x	D= 6mm	L=2mm	x		10 PÇ	USINADAS

Tabela 3.1 - Operações de usinagem para confecção dos corpos de prova, dos materiais estudados, utilizados nos ensaios de compressão diametral "TESTE BRASILEIRO", para a determinação de suas tenacidades.

3.2 METAIS DUROS

Os metais duros são materiais compósitos, os quais apresentam, simultaneamente, elevada dureza e tenacidade. A combinação de elevada dureza com tenacidade não é facilmente encontrada em outros materiais, propiciando aos metais duros um grande número de aplicações industriais até hoje insubstituíveis. Entre suas principais aplicações podemos citar: as ferramentas de usinagem para corte em alta velocidade, matrizes e punções de estiramento, trefilação e para operações de estampagem, extrusão, conformação a frio em geral, insertos para brocas de mineração [Ba 87], componentes resistentes ao desgaste e diversos elementos de máquinas.

Os metais duros são obtidos por metalurgia do pó. Partindo-se de misturas de partículas de pó muito finos de carbonetos duros e refratários, com partículas também muito finas de um ligante metálico, são compactados e sinterizados. O componente metálico, que confere a tenacidade ao composto é denominado fase ligante. Esta necessita de propriedades específicas apenas encontrada em poucos metais ou ligas.

Os chamados "metais duros" apresentam duas fases distintas, uma extremamente dura e a outra chamada de tenaz. Neste processo, o Carbetto de Tungstênio-WC é predominantemente utilizado como fase dura e o Cobalto-Co utilizado como metal ligante o qual confere a tenacidade necessária para cada aplicação específica deste material. Porém, outros carbonetos como o Carboneto de Titânio-TiC; Carboneto de Tântalo-TaC e o Carboneto de Nióbio-NbC também são utilizados, ainda que em teores pouco elevados, juntamente com o WC.

Como metal ligante pode-se utilizar ainda o Níquel e o Ferro na fabricação dos metais duros [Sa 89], sacrificando as propriedades mecânicas, notadamente sua tenacidade, e com isso, restringindo sua aplicação a casos especiais.

O metal duro, apresenta-se com uma variedade bastante extensa em função da sua composição química sendo classificado para cada tipo de aplicação conforme normalização brasileira NBR 6384/80 e NBR 6450/80, baseado na recomendação ISO, e conforme a Norma DIN 4990. Neste trabalho, restringimos em quatro classes o total de amostras para serem ensaiadas, sendo estas fornecidas nos formatos de insertos cilíndricos e/ou pastilhas para ferramentas de corte e usinagem. Na tabela 3.2 apresentamos as quatro classes escolhidas do metal duro com suas características e composições químicas, bem como suas respectivas propriedades físicas.

Tabela 3.2 - Especificações gerais das quatro classes de "metal duro" escolhidas e utilizadas neste estudo conforme dados do fabricante (BRASSINTER).

Classes	Composição Química				Propriedades Físicas		
	WC%	TiC%	TaC%	Co%	Dureza HRA	Densidade g/cm ³	Ruptura MPa
HF	97,00			3,00	93,0	15,10	1.200
NHA	95,00			5,00	92,4	14,95	1.700
HA	94,25			5,75	91,6	14,85	1.800
MPD-2	87,85			12,25	87,8	14,25	2.450

3.3 Al₂O₃ - ALUMINA

Um dos mais antigos cerâmicos especiais e que encontra atualmente um largo espectro de aplicações industriais é a alumina sinterizada ("Sinterkorund"), desenvolvida na Alemanha no início da década de 30 [Ho 32]. Sua primeira aplicação em larga escala e que perdura até os dias de hoje, foi como corpo isolante em velas de ignição.

Mas foi apenas nos anos 60, com a crescente demanda e sofisticação tecnológica exigida, entre outras razões, pela aceleração da "corrida espacial", que este material surgiu com todo o seu potencial de aplicações, tornando-se o primeiro cerâmico de "custo efetivo" [Ra 83]. Isto é, aquele cuja produção e utilização prática em larga escala implica em um ganho efetivo em relação à utilização de outros materiais.

As razões para esta viabilidade econômica repousam no seu baixo custo de produção (matéria prima mais processamento) e grande resistência ao desgaste e à abrasão, bem como excelente refratariedade e alta resistência mecânica. O baixo custo de produção da alumina sinterizada, comparada a outros cerâmicos especiais é devido, principalmente, ao baixo preço de sua matéria prima, que são os pós calcinados de α - Al₂O₃, obtidos pelo processo Bayer [FI 78] a partir da bauxita, minério bastante abundante na crosta terrestre.

No presente trabalho utilizamos dois tipos de alumina - (Al₂O₃), as quais fazem parte da família dos chamados "óxidos cerâmicos - estruturais", que se caracterizam pela natureza principalmente iônica de suas ligações atômicas e devido as suas importâncias em aplicações industriais. Uma delas, apresenta em sua composição diversos elementos para conferir-lhe uma maior tenacidade e,

está classificada dentro das "funções mecânicas" como ferramenta para corte de alta velocidade e utilizada no processo de usinagem de materiais metálicos e outros. A outra alumina escolhida para ser estudada, apresenta em sua composição uma grande porcentagem de Al_2O_3 (na ordem de 90 %), largamente utilizada na fabricação de componentes mecânicos para equipamentos empregados principalmente nos setores industriais como químico, farmacêutico, fertilizantes, papel e petroquímica.

3.3.1 ALUMINA COM CARBETO DE TUNGSTÊNIO (Al_2O_3 - WC)

Este material utilizado como ferramenta para corte de metais em alta velocidade é composto de 50% de carbetos de tungstênio (WC), 40% de óxido de alumina (Al_2O_3) e aditivos de outros carbetos e óxidos. Devido à pureza dos carbetos e óxidos cerâmicos utilizados na produção desta cerâmica estrutural, ocorre uma melhora considerável em suas propriedades mecânicas. Uma vez que o óxido puro de alumina é um isolante térmico, para que haja uma melhora da condutividade térmica é adicionado um elevado percentual de carbetos de tungstênio (WC).

Em comparação com as ferramentas tradicionais de carbetos de tungstênio, esta alumina estrutural permite uma considerável elevação na velocidade de corte, ou seja: para a usinagem de ferro fundido varia de 100 a 300% e para os aços este rendimento pode ser elevado entre 40 e 80%. Na tabela 3.3, apresentamos algumas propriedades físicas desta alumina estrutural produzida comercialmente pelo nome de Revolox.

Tabela 3.3 - Especificações gerais de propriedades físicas da cerâmica estrutural estudada, conforme dados fornecidos pelo fabricante (REVOLOX).

ESPECIFICAÇÕES	PROPRIEDADES FÍSICAS	
Densidade (g/cm ³)	6,9	
Dureza, Vickers 3 kgf (kgf/mm ²)	1700-1750	
Dureza, Rockwell A (RA)	92-92,5	
Resistência à ruptura transversal (MPa)	552	
Resistência à tração (MPa)	379	
Resistência à compressão (MPa)	3. 793	
Módulo de elasticidade (MPa)	410.000	
Condutividade térmica cal/cm seg °C	0,05	
Coeficiente de expansão térmica 1 / °C Faixas	300	6,3. 10
	600	6,7. 10
	900	7,2. 10
Calor específico cal/g °C	0,12	
Resistividade ohm.cm	650	

3.3.2 CERÂMICA DE ALTA ALUMINA (90% - Al₂O₃)

Este material classificado como sendo de "alta alumina" é composto de 90% de óxido de alumina (Al₂O₃) e outros componentes como: Óxido de Silício - SiO₂, Óxido de Ferro - Fe₂O₃ e porcentagens de fundentes. Esta cerâmica conhecida como de alta tecnologia tem aplicações na indústria química por apresentar inúmeras vantagens se comparada aos metais, mesmo incluindo os aços inoxidáveis especiais.

A sua alta resistência a abrasão, ao ataque químico, exceto HF, associada a sua alta resistência mecânica, credenciam esta cerâmica como de alta performance para que seja utilizada na fabricação de peças de bombas dosadoras e bombas alternativas em geral, através dos seus diversos componentes como: pistões, eixos, mancais, anéis para selos mecânicos, entre outros componentes de máquinas.

Além da indústria química este material, pelas suas propriedades notadamente resistência à abrasão associada à resistência ao ataque químico é também utilizada na fabricação de peças de alto desgaste como: bicos de pulverizadores agrícolas, atomizadores (spray-dryer), pistola para pintura, paredes internas para moinhos de bola, raspadores diversos, e outros. Na tabela 3.4, apresentamos algumas propriedades físicas desta cerâmica produzida comercialmente pela NTK.

Tabela 3.4 - Especificações gerais de propriedades físicas de cerâmica estrutural estudada e utilizada para a fabricação de componentes mecânicos de bombas e outros equipamentos para utilização na indústria química e correlatos.

ESPECIFICAÇÕES	PROPRIEDADES FÍSICAS
Densidade aparente (g/cm ³)	3,6
Dureza Rockwell A 15 N	83
Resistência à compressão (Mpa)	270
Condutividade térmica cal/cm.seg. °C	0,03
Dilatação térmica 1/ C (25-700 °C)	8,0. 10
Absorção de água %	< 0,1
Cor do produto	Branco

3.4 NITRETO DE SILÍCIO Si_3N_4

Dentro do grupo de cerâmicas e que vêm apresentando um crescente interesse pelo seu grande potencial como mais um material estrutural em temperaturas elevadas está o Nitreto de Silício - Si_3N_4 . Esta cerâmica de ligações covalentes, exibe uma notável combinação de propriedades mecânicas e térmicas até temperaturas bastante elevadas, entre 1300 a 1500 °C. Este material tem sido alvo de intensas pesquisas ao longo da última década e notáveis progressos vem sendo obtidos aos métodos de produção que permitem a obtenção de materiais bastante densos e resistentes. Até então a utilização comercial do Nitreto de Silício limitava-se ao seu uso como ligante em materiais refratários de SiC [Au 83]. Hoje, entretanto, já participa no desenvolvimento de máquinas de combustão interna como componentes de motores diesel e turbinas à gás graças ao excepcional desempenho deste material em altas temperaturas e ambientes corrosivos.

A amostra utilizada neste estudo contém em sua composição, além do Nitreto de Silício-(Si_3N_4), quantidades de Alumina-(Al_2O_3) e Carbeto de Titânio-TiC. O "Sialon", seu nome comercial, é produzido com esta composição sob forma de pastilhas pretas e tem se destacado das outras cerâmicas por permitir altíssima velocidade de corte na usinagem de ferro fundido e ligas de níquel. Isto se deve a sua dureza a quente e, sobretudo, a boa resistência a choques térmicos.

A seguir na tabela 3.5, são apresentadas algumas propriedades do Nitreto de Silício - Si_3N_4 fabricados pela (KENNAMETAL) e produzido comercialmente com o nome de Kyon 3000. Podemos destacar a elevada tenacidade desta classe de cerâmica se comparada à família das Aluminas - Al_2O_3 , utilizada também como ferramenta para corte em alta velocidade.

Tabela 3.5 - Especificações gerais de propriedades físicas do Nitreto de Silício estudado, conforme dados fornecidos pela (KENNAMETAL), fabricante do Kyon 3000. Empregado na fabricação de ferramentas para corte em alta velocidade, utilizada na usinagem dos metais como os ferros fundidos e aços para a indústria automobilística e construção mecânica.

Especificações gerais da cerâmica covalente Si₃N₄ [De 85]	
Densidade teórica (g/cm ³)	3,19
Módulo de elasticidade, E (MPa)	230.000
Dilatação linear α (20-1400C) (1/°C)	3,0. 10
Condutividade térmica λ (W/m.k)	10-15
Variação da temperatura crítica ΔT_c °C	500-600
Resistência à flexão (quatro pontos) (MPa)	800
K _{IC} (MPa/ \sqrt{m})	3,5 - 7,0

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS CERÂMICOS

4.1 INTRODUÇÃO

As cerâmicas são normalmente conhecidas como materiais frágeis pois, ao contrário dos metais, não podem sofrer deformação plástica significativa à temperatura ambiente. A capacidade delas em absorver energia e com isso evitar a propagação de trincas, em geral é muito pequena. Estes materiais, quando submetidos a solicitações, respondem linearmente com o crescimento elástico da tensão/deformação até atingir o limite de ruptura. Geralmente neste momento o material apresenta uma ruptura catastrófica, conforme ilustrado na figura 4.1(a).

Quando submetidas a solicitações em altas temperaturas, existe a ocorrência de vários mecanismos envolvendo escoamento plástico agindo contra a fragilidade. Entretanto, é escassa a existência de dados experimentais para esses materiais testados em altas temperaturas, restringindo-nos assim, a compreensão dos mecanismos inerentes às propriedades mecânicas em elevadas temperaturas quando o material sofre processos de deformação complexos.

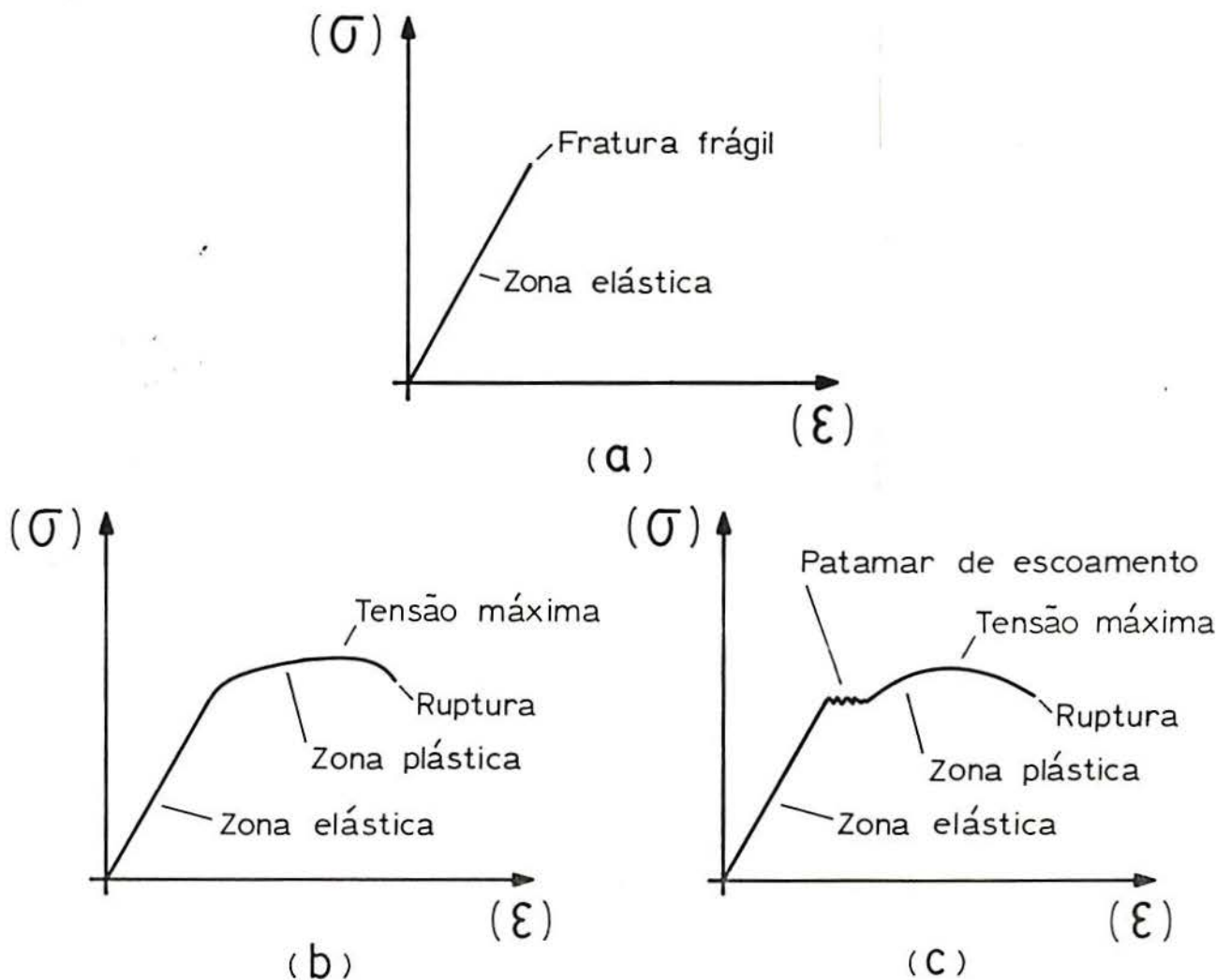


Figura 4.1 Gráficos típicos de tensão-deformação: (a) fratura frágil, típica das cerâmicas; (b) deformação plástica sem limite de proporcionalidade definido; (c) deformação plástica com limite de proporcionalidade bem definido.

4.2 DUREZA

O método Vickers de microdureza consiste em comprimir um indentador de diamante sobre o material a ser ensaiado, previamente polido, por intermédio de uma carga específica e durante um tempo estabelecido. O indentador utilizado no ensaio Vickers é formado por uma pirâmide de diamante de base quadrada com 136° de ângulo entre suas faces opostas. A carga aplicada ao ensaio ficou estabelecida por faixa conforme o material testado. Para os ensaios de microdureza utilizamos cargas entre 1 e 500 gf, já para os ensaios tradicionais de dureza Vickers as cargas variaram entre 1 e 120 kgf. No presente trabalho, utilizou-se cargas diversas em função da diversidade dos materiais estudados, sendo que o tempo de aplicação da carga foi sempre de 15 segundos, conforme recomenda a Norma ISO 3878 - 1976. A medida das diagonais da impressão é efetuada no próprio microscópio ou lupa a que está montado o dispositivo de dureza Vickers, conforme mostra a figura 4.2-b.

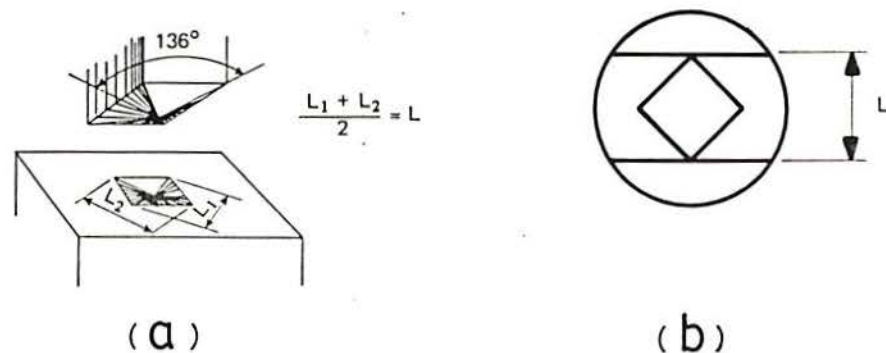


Figura 4.2 - Representação esquemática de um ensaio de microdureza Vickers, (a) Indentação da pirâmide; (b) medição das diagonais.

A dureza, assim, é definida pela razão entre a carga aplicada e a área da indentação, obtida a partir da média da medida das diagonais, conforme fórmula 4.1;

$$H = \frac{2P \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = 1.8544 \frac{P}{L^2} \quad [4.1]$$

onde:

P = carga aplicada, [N]

L = comprimento médio das diagonais, [mm]

θ = ângulo entre as faces opostas do diamante=136°.

Este método é amplamente empregado, não somente em amostras de pequenas dimensões, mas também na determinação da dureza de camadas extremamente finas e até no ensaio de diferentes fases microestruturais de uma liga, [Di 81], [So 82], [BZ 83].

4.3 TENACIDADE

Os ensaios usualmente utilizados para a determinação da tenacidade à fratura de um material, apresentam um grande inconveniente quando executados em materiais cerâmicos. Primeiro, devido à complexa forma geométrica dos

corpos de prova. Segundo, pela necessidade de um defeito, para simular a pior condição possível de ser encontrada na prática. Para obtermos esta severidade máxima, o usual é provocarmos uma pré-trinca de fadiga com um raio de curvatura da ponta tendendo a zero. Entretanto, nos materiais cerâmicos seria quase impossível obtermos uma trinca de fadiga. Terceiro, ao grande volume de material necessário para confeccionar o corpo de prova.

Um método que tem recebido uma crescente aceitação para materiais cerâmicas é o ensaio DCM - (Direct Crack Measurement). Este método tem como vantagem a grande simplicidade para obtenção das amostras necessárias para a sua realização, qual seja, uma superfície polida. Para a determinação da tenacidade à fratura dos materiais cerâmicos estudados, utilizou-se também esta técnica da impressão de dureza. Por esta técnica, e após a indentação provocada por uma carga "P", mede-se o tamanho das trincas, relacionando-a diretamente ao valor de K_{IC} do material [EC 76]. Isto é obtido mediante o emprego de fórmulas adequadas [OTF 87], para determinar-se o valor da tenacidade do material à fratura.

Neste trabalho, buscamos verificar também a validade deste método, o ensaio DCM, para materiais cerâmicos que apresentam uma maior tenacidade, como o metal duro nas classes HF, NHA, HA e MPD-2, com teores crescentes de cobalto em suas constituições, nos valores de 3.00, 5.00, 5.75 e 12.25 % respectivamente, conforme mostrado na tabela 3.2.

Para a utilização da técnica acima descrita, as amostras foram todas desbastadas e retificadas com rebolos diamantados sendo após polidas com pasta de diamante com granulometrias decrescentes de até $0,25 \mu m$. Com as amostras prontas e devidamente inspecionadas, passávamos à impressão de diversos pontos de dureza. O tamanho das trincas referente às indentações

realizadas foram medidas em um microscópio eletrônico de varredura-MEV, marca Cambridge, modelo Stereo Scan 500. A fórmula utilizada para o cálculo do K_{IC} foi, [OTF 87];

$$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} \right) \quad [4.2]$$

onde:

E = módulo de elasticidade, [MPa]

H = dureza,

P = carga, [N]

c = tamanho da trinca originada, [mm].

Na figura 4.3 encontra-se um desenho esquemático do sistema de fratura ocasionado pela indentação,

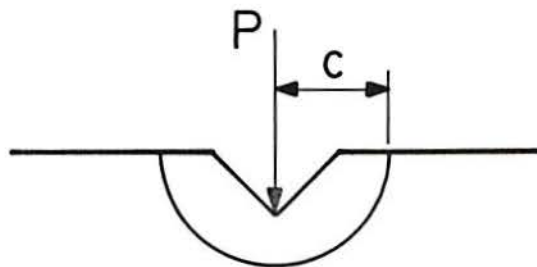


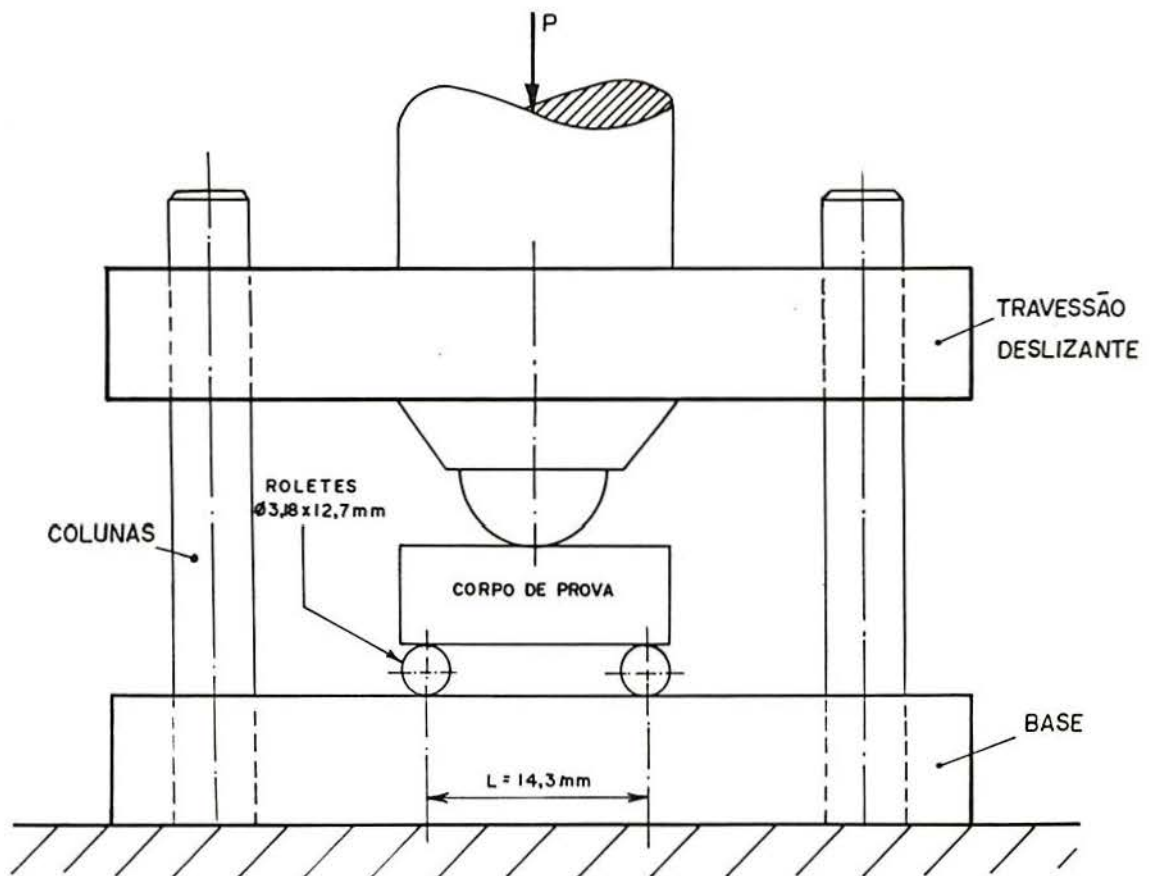
Figura 4.3 - Sistema de fratura ocasionado pela indentação, onde "P" é a carga [N] e "c" é o tamanho da trinca medida em [mm].

4.4 ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

Entre os diversos materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, um deles, classificado como cerâmica de "alta alumina" - (Al_2O_3 - 90%), foi submetido também a ensaios de flexão pois o fornecedor NTK do Brasil nos cedeu esta cerâmica sem os valores da resistência à ruptura transversal. Os ensaios realizados são descritos a seguir.

Os ensaios de flexão para a determinação da tensão de ruptura transversal foram realizados segundo Norma ASTM B-406-76. A referida Norma prevê o ensaio de materiais cerâmicos através da utilização de corpos de prova padronizados com dimensões de altura (h) = $5,0 \pm 0,25$ x espessura (b) = $6,0 \pm 0,25$ e comprimento (l) = 19 mm (mínimo), apresentando um acabamento em que a rugosidade superficial seja de no máximo $0,4 \mu\text{m}$ (R.M.S.) nas quatro superfícies, sendo as mesmas retificadas e polidas. A variação do paralelismo entre as superfícies polidas opostas, não deve ser superior a 0,02 mm. A figura 4.4 mostra, esquematicamente, a disposição do corpo de prova no dispositivo de flexão, bem como as suas dimensões principais. O dispositivo é composto de um travessão deslizante, o qual é guiado por duas buchas em duas colunas retificadas. No centro deste travessão deslizante está montada uma esfera de metal duro-WC polida, com um diâmetro de 10 mm. O corpo de prova se apoia sobre dois cilindros de metal duro, ambos encaixados em sulcos usinados na base inferior distantes 14,3 mm. O corpo de prova deve ser posicionado através do auxílio de um parafuso micrométrico, levando-se em conta suas dimensões, de tal forma que a esfera concentre a carga aplicada na parte central do referido corpo de prova. Este último deve ainda ficar perpendicular à geratriz dos cilindros

de apoio. O deslocamento do travessão deslizante é feito através da máquina universal de ensaios, com uma velocidade de aplicação da carga que não exceda a uma taxa de carregamento de 1,5 kN/segundo.



$$\text{RESISTÊNCIA A RUPTURA TRANSVERSAL} = \frac{3PL}{2bn^2}$$

P = CARGA EM N

L = 14,3mm

b = LARGURA DO CORPO DE PROVA (6,4mm)

n = ESPESSURA DO CORPO DE PROVA (mm)

Figura 4.4 - Desenho esquemático do dispositivo utilizado para realizar o teste de ruptura transversal por ensaio de flexão a três pontos, segundo as Normas ASTM B406/76 e ISO 3327/75.

O cálculo da tensão de ruptura por flexão é determinado pela seguinte fórmula [Or 76]:

$$\sigma_{RF} = \frac{3 P L}{2 b h^3} \quad [4.3]$$

onde:

σ_{RF} = tensão de ruptura por flexão, [MPa]

P = carga requerida para a fratura, [N]

l = distância entre apoios, [mm]

b = largura do corpo de prova, [mm]

h = espessura do corpo de prova. [mm]

A Norma prevê que sejam usados lotes de cinco corpos de prova, bem como um critério de tratamento estatístico, para prevenir as possíveis flutuações dos valores encontrados; por tratar-se de materiais frágeis. Esse critério será abordado na parte relativa à apresentação dos resultados, capítulo 6 e no apêndice "A".

4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Neste trabalho foi estudada a viabilidade de se caracterizar a resistência

dos materiais cerâmicos, sempre que estes forem considerados de pequenas dimensões, através do Ensaio de Compressão Diametral "TESTE BRASILEIRO", [Ca 37], [CA 37], [Ca 53]. Baseados em normalização brasileira, ABNT MB212/58 e NBR 7222/83, ambas utilizadas exclusivamente para a determinação da resistência à tração de argamassas e concretos, procurou-se adaptar o ensaio a peculiaridade das respectivas dimensões (consideradas grandes) sugeridas por estes métodos. A expressão sugerida pelos métodos normalizados acima citados e utilizada neste trabalho é a seguinte:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi D L} \quad [4.4]$$

Onde:

σ = limite de resistência à tração simples, [MPa]

P = carga de ruptura, [N]

D = diâmetro do corpo de prova, [mm]

L = comprimento (espessura) do corpo de prova. [mm]

Assim, para os materiais com elevado módulo de elasticidade que é o caso de muitos materiais metálicos e cerâmicos, a teoria mais conhecida é a teoria das tensões de Hertz [He 96] ou tensões de contato, amplamente utilizada no dimensionamento de elementos de máquinas [Ni 67], [Sn 84].

No projeto de máquinas e equipamentos, temos generalizadamente situações estabelecendo superfícies planas e curvas em contato, pressionadas umas contra as outras, tanto na forma estática como dinâmica; sendo que em qualquer uma delas, leva a um estado traxial de tensões. Quando isto ocorre, o

ponto ou linha de contato passa a ser efetivamente a área de contato, desenvolvendo-se nestas regiões tensões tridimensionais. Estes problemas de tensões de contato aparecem entre uma roda e um trilho, no engrenamento entre duas rodas denteadas (engrenagens) assim, como mancais de rolamento, entre outros, conforme Figura 4.5.

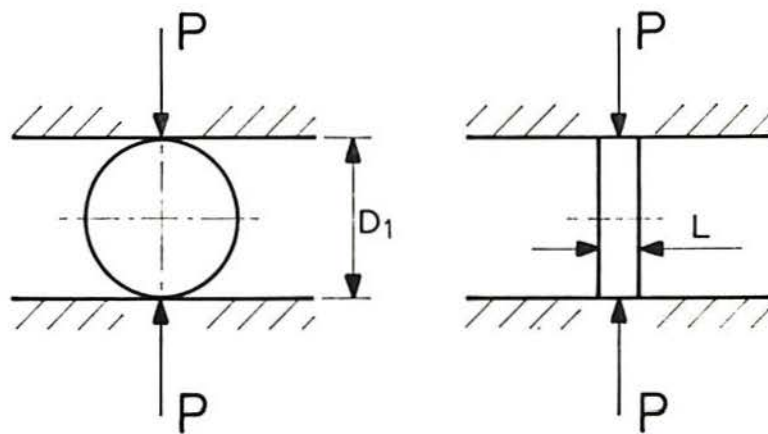


Figura 4.5: Dimensões D e L de um corpo de prova cilíndrico montado em uma bigorna de Bridgman para o ensaio de compressão diametral através da aplicação de uma carga P .

Para prevenirmos a ocorrência de falha superficial nos componentes em contato é necessário termos um meio de calcular os estados de tensões que resultam do carregamento de um corpo sobre o outro.

No caso de duas superfícies cilíndricas em contato, a área efetiva deste contato é um estreito retângulo com as dimensões de: *largura* $= 2b$ e *comprimento* $= L$ [Sh 84], [LMP 85] sendo,

$$b = \left(\frac{2P}{\pi L} \left[\frac{\frac{(1-\mu_1)}{E_1} + \frac{(1-\mu_2)}{E_2}}{\left(\frac{1}{D_1}\right) + \left(\frac{1}{D_2}\right)} \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad [4.5]$$

Onde,

b = Metade da largura de contato, [mm]

P = Carga, [N]

L = Comprimento (espessura) do corpo de prova, [mm]

D = Diâmetro do corpo de prova, [mm]

μ_1, μ_2, E_1, E_2 = Coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade dos respectivos materiais em contato, o último em [MPa].

Assim, a configuração da pressão apresenta-se elíptica segundo a *largura* = $2b$, sendo que a pressão máxima ($p_{máx.}$) é,

$$P_{máx} = \frac{2P}{\pi b L} \quad [4.6]$$

Onde,

P = Carga, [N]

b = Metade da largura da superfície de contato, [mm]

L = Comprimento (espessura) do cilindro comprimido, [mm].

As equações [4.5] e [4.6] podem também ser aplicadas no estudo do contato de uma superfície cilíndrica com uma plana simplesmente considerando $D_2 = \infty$ (infinito), conforme figura 4.6.

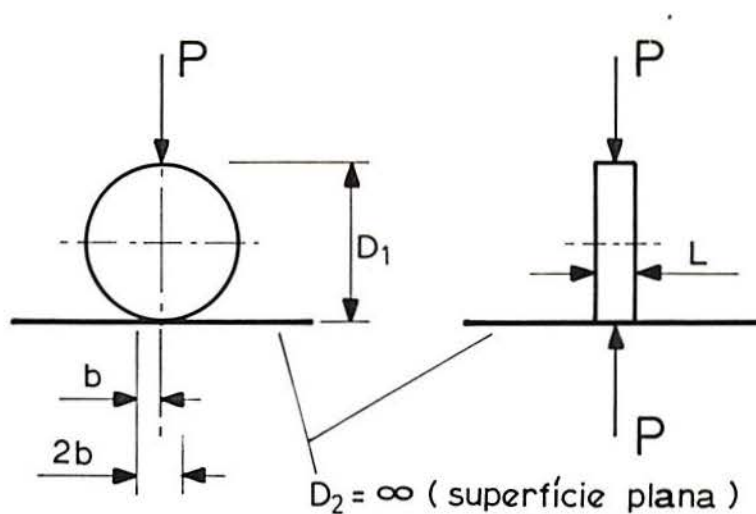
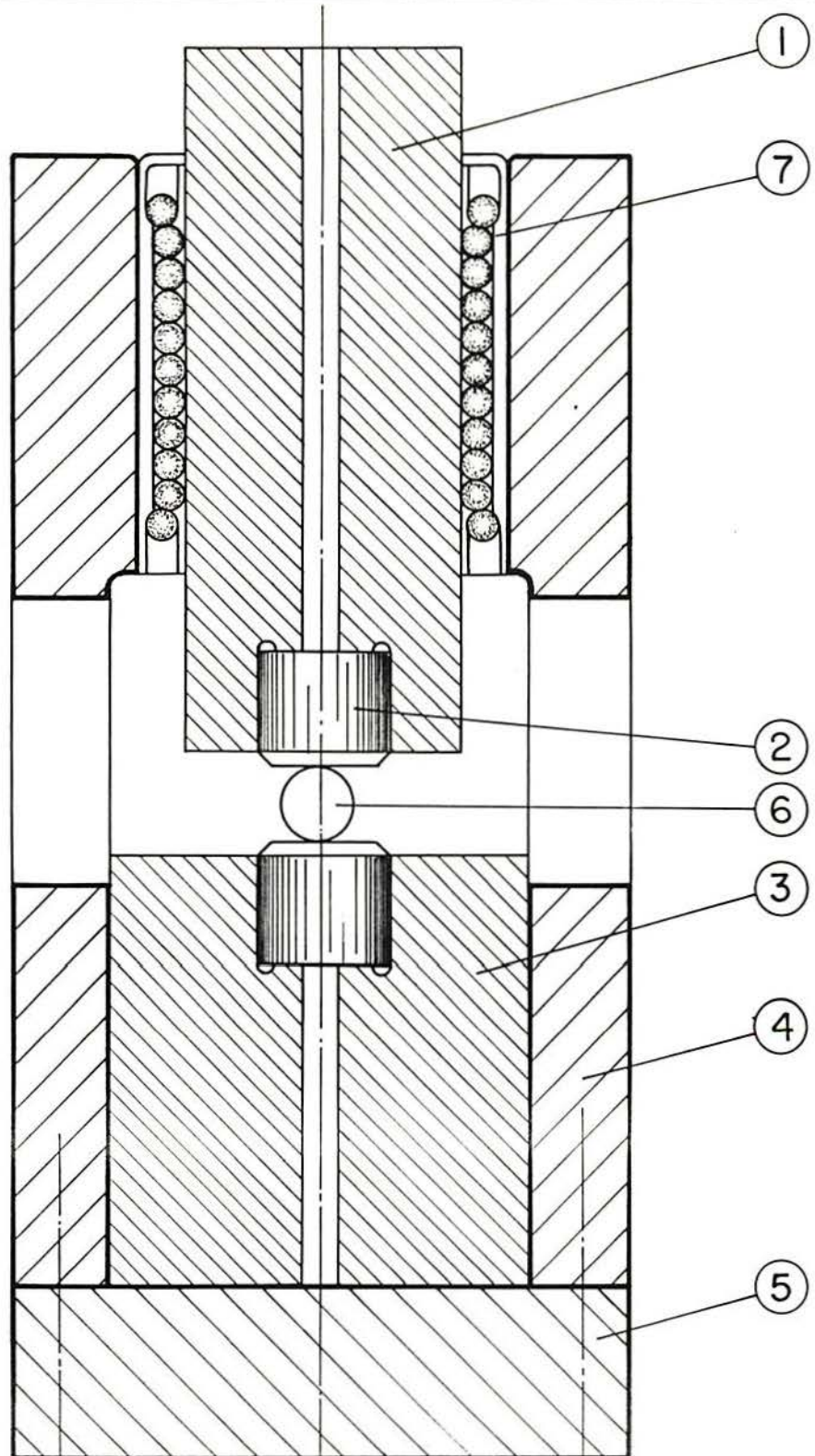


Figura 4.6: Superfície cilíndrica junto a uma superfície plana caracterizando uma área de contato com as dimensões $2b \times L$.

Os corpos de prova dos materiais cerâmicos aqui estudados, foram confeccionados conforme descrito no capítulo 5, item 5.2. Neste capítulo, no item 5.3, também são descritos detalhadamente como foram realizados os ensaios mecânicos e os testes de compressão diametral. Visando obter um bom alinhamento durante o ensaio, foi utilizado um dispositivo Bigorna de Bridgman, projetado com bucha de esferas no punção superior para minimizar o atrito e construído em aço temperado SAE D6. Para resistir as tensões concentradas e minimizar as deformações localizadas nas faces dos punções que fazem contato com os corpos de prova foram montados cilindros de metal duro por interferência conforme mostra a figura 4.7.



- ① PUNÇÃO SUPERIOR
- ② INCERTO CILINDRO DE METAL DURO
- ③ PUNÇÃO INFERIOR
- ④ TUBO GUIA
- ⑤ BASE
- ⑥ CORPO DE PROVA
- ⑦ BUCHA DE ESFERA

ESCALA

1:1

BIGORNA DE BRIDGMAN

41

FIGURA 4.7

ESCOLA DE ENGENHARIA

4.5.1 VANTAGENS, NORMALIZAÇÃO

O ensaio de compressão diametral, apresenta-se como uma alternativa de teste para a determinação das propriedades mecânicas de diversos materiais cerâmicos. O mesmo já está consagrado para algumas áreas da engenharia que o utilizam com corpos de prova de grandes dimensões. Entretanto, o mesmo pode ser utilizado em peças com pequenas dimensões.

Pela pesquisa bibliográfica este método, "Ensaio de Compressão Diametral", vem sendo amplamente utilizado no controle de qualidade de produtos e elementos estruturais em diversas áreas industriais tais como; Indústria farmacêutica [Zi 78], indústria de mineração para a caracterização de rochas [Kj 88], indústria do aço para a caracterização dos carvões tipo coque utilizado como combustível na siderurgia [LW 82], indústria rodoviária para a caracterização das pavimentações de rodovias [AK 72], [Ch 75] e também, na caracterização de propriedades mecânicas de materiais orgânicos como espigas de milho, cana de açúcar e outros [SSF 76]. Estes dados são de extrema importância para o desenvolvimento de projeto na indústrias de máquinas e implementos agrícolas, tendo em vista a mecanização e automação destes setores industriais entre outros.

No Brasil entretanto, esta técnica, "**Ensaio de Compressão Diametral**" ou "**TESTE BRASILEIRO**", [Ca 37], [CA 37], [Ca 53], que é normalizado pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas através das Normas MB-212/58 e NBR 7222/83, é utilizada com exclusividade para a determinação de propriedades mecânicas de argamassas e concretos, com a resistência à tração obtida de forma indireta através deste método.

4.5.2 ALINHAMENTO, DISPOSITIVOS (BIGORNA DE BRIDGMAN)

A fase experimental deste estudo foi iniciada com a realização de diversos ensaios de compressão diametral em materiais cerâmicos comuns, objetivando estabelecer uma rotina do referido ensaio e principalmente verificar a sua reprodutibilidade.

Os ensaios iniciais não apresentaram resultados repetitivos. Os ensaios foram realizados em lotes de cinco corpos de prova, variando as dimensões D e L, diâmetro e espessura respectivamente. A reprodutibilidade continuou não ocorrendo levando a conclusão que o equipamento utilizado não apresentava as condições técnicas necessárias para a realização do ensaio de compressão diametral feito de forma direta nas máquinas universais de ensaio.

Assim, dentro dos propósitos deste trabalho, a caracterização de propriedades mecânicas de materiais cerâmicos utilizando o método Ensaio de Compressão Diametral - "TESTE BRASILEIRO", foram evidenciados problemas de falta de axialidade na aplicação do carregamento e as condições físicas das superfícies de contato entre corpos de prova e os dispositivos das máquinas universais de ensaios, quando operadas na opção compressão.

Considerando que as amostras testadas eram de pequenas dimensões, tendo os seus diâmetros variando entre 5 a 22 mm; ficou constatada necessidade de manter a axialidade da carga de compressão bem como a rigidez superficial nas regiões de contato.

Com este objetivo foi construído um dispositivo nos moldes da Bigorna de Bridgman, mostrado na figura 4.7. Este dispositivo foi projetado e construído

em aço ferramenta para trabalho a frio, SAE D6, temperado/revenido. Sua configuração consta de um tubo retificado internamente com uma base fixada com seis parafusos M6 x 30 mm, na sua extremidade inferior e com isso facilitando a montagem/desmontagem para proceder a limpeza e lubrificação.

Esta configuração além de proporcionar uma excelente rigidez ao dispositivo, também serve como tubo guia onde deslizam os dois punções, inferior e superior. O punção inferior é montado de maneira que deslizando pelo interior do tubo guia fique alojado sobre a base tipo flange fixada na extremidade inferior deste. Já o punção superior que se movimenta durante o ensaio para a transmissão da carga sobre o corpo de prova, tem seu deslizamento propiciado por uma bucha de esferas tipo rolamento linear e com isso permitindo reduzir consideravelmente os possíveis atritos laterais. Ainda, sobre os punções aonde ocorre o contato com o corpo de prova, estes com formato cilíndrico, foram montados insertos de metal duro, para minimizar as deformações nas regiões de contato que ocorrem durante a realização do ensaio de compressão diametral.

4.5.3 TENSÕES DE CONTATO

Dentro das tensões de contato estudadas inicialmente por Hertz [He 96] e posteriormente também estudadas por outros cientistas [Ni 67], [Sn 84], ficou demonstrada a necessidade de classificar a forma geométrica das superfícies que formarão o contato. Desta forma, classificamos o ensaio de compressão diametral - "TESTE BRASILEIRO", por um contato cilíndrico do corpo de prova contra uma superfície plana. No presente estudo trata-se da superfície plana dos

punções do dispositivo tipo Bigorna de Bridgman, aonde ocorrem efetivamente os carregamentos com as respectivas pressões de contato ou tensões de Hertz.

As tensões e as deformações que se verificam no caso de se comprimirem reciprocamente dois corpos que estão em contato, chamam-se tensões e deformações de contato ou tensões de Hertz. O material na zona de contato, sendo impossibilitado o desenvolvimento livre da deformação, permanece em estado de tensão volumétrica, vide figura 4.8.

As tensões de contato têm um caráter eminentemente local, diminuindo rapidamente de valor à medida em que se afastam da zona de contato. Para estas tensões de contato convém dispensar uma grande atenção no decorrer do cálculo da resistência de alguns elementos, subconjuntos de componentes mecânicos como rolamentos de esferas e de rolos, mancais de deslizamento rodas denteadas, rodas e trilhos ferroviários, etc.

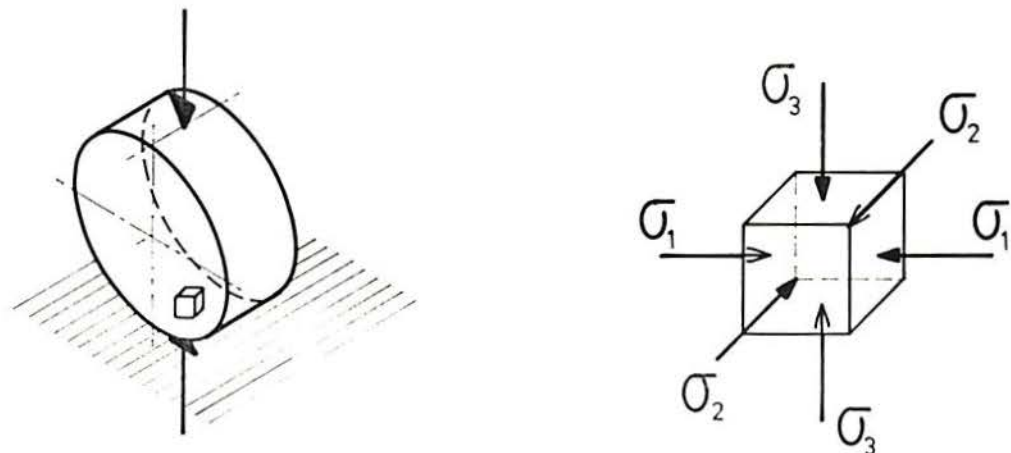


Figura 4.8 Corpo cilíndrico contra uma superfície plana caracterizando um estado triaxial de tensões.

H. Hertz [He 96], apresentou soluções acerca das tensões e deformações de contato utilizando os métodos da teoria da elasticidade. A seguir, são apresentadas algumas equações para o cálculo das tensões e deformações de contato, formuladas a partir das seguintes proposições:

- * As tensões na zona de contato não excedem o limite de elasticidade;
- * A área das superfícies em contato é desprezível em comparação com a das superfícies dos corpos em contato;
- * As forças de pressão repartidas pelas superfícies, tornam-se normais à mesma.

Assim, quando as superfícies em contato são cilíndricas, a área de contato é um retângulo estreito de largura $2b$, sendo:

$$b = \left(\frac{\frac{2P}{\pi L} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}{\left(\frac{1}{d_1} \right) + \left(\frac{1}{d_2} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [4.7]$$

Onde:

b = Metade da largura de contato, [mm]

P = Carga, [N]

L = Espessura do corpo de prova, [mm]

D = Diâmetro do corpo de prova, [mm]

μ_1, μ_2, E_1, E_2 = Coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade dos respectivos materiais em contato, [MPa].

A pressão " p " então, passa a ter uma distribuição elíptica segundo a largura $2b$ e sua tensão máxima ($p_{máx}$) será:

$$p_{\text{máx}} = -\frac{2P}{\pi b L} \quad [4.8]$$

Onde:

$p_{\text{máx}}$ = Pressão máxima, [MPa]

P = Carga, [N]

b = Metade da largura da superfície de contato, [mm]

L = Comprimento do cilindro submetido à compressão. [mm]

As equações 4.7 e 4.8 aplicam-se a um cilindro contra outra superfície cilíndrica. Quando uma das superfícies for plana pode-se considerar o diâmetro " d_2 "=infinito. Já, no contato de um cilindro e uma superfície cilíndrica interna, " d_2 " passa a ser negativo. Neste trabalho, classificou-se a geometria das superfícies que formarão o contato da seguinte forma: uma delas é cilíndrica - (corpo de prova) contra a outra que é plana - (superfície do punção). Em seguida selecionamos, entre os modelos apresentados pela bibliografia, as equações recomendadas para o caso específico e, com isso, pode-se determinar, após o ensaio, as características de resistência dos materiais estudados.

Para a configuração do estado de tensão, seleciona-se a origem de um sistema de referência no centro da área de contato, com o eixo "x" paralelo aos eixos dos cilindros, o eixo "y" será perpendicular ao plano formado pelos eixos dos dois cilindros e o eixo "z" estará no plano da força de contato. Então, para elementos de tensão situados no eixo "z" haverá três tensões principais, σ_x , σ_y e σ_z , todas diferentes. Há três tensões cisalhantes diferentes; sendo que a maior delas será:

$$\tau_{yz} = \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \quad [4.9]$$

Onde: τ_{yz} = Tensão cisalhante,
 σ_y = Tensão principal no eixo y,
 σ_z = Tensão principal no eixo z.

Esta tensão, também chamada $\tau_{m\acute{a}x}$ está representada graficamente na figura 4.9. Podemos observar que ela atinge um valor máximo logo abaixo da superfície, assim como no caso das esferas em contato.

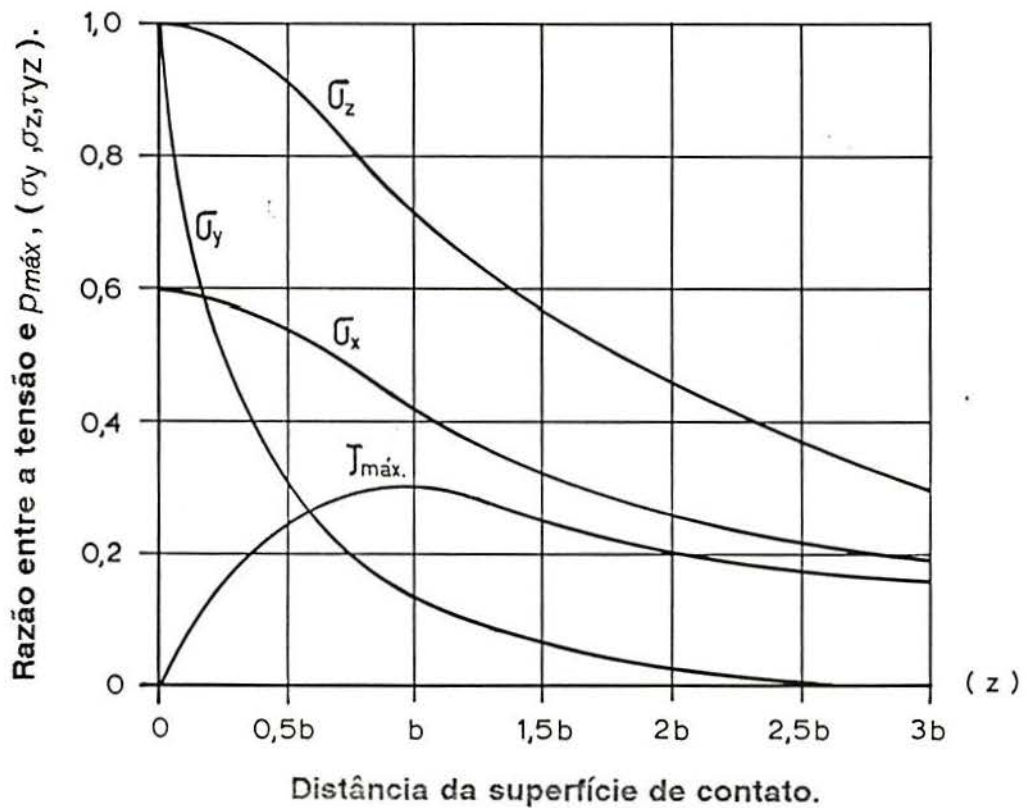


Figura 4.9 - Intensidade das tensões abaixo da superfície como uma função da pressão máxima ($\rho_{m\acute{a}x}$) de cilindros em contato. Das três tensões cisalhantes, a maior é paralela ao plano "zy". Esta tensão tem valor aproximado de $0,3 \rho_{m\acute{a}x}$ e ocorre logo abaixo da superfície de contato.

4.5.4 EQUAÇÕES

Uma equação que relaciona o módulo de elasticidade e a deformação total de um corpo de prova com formato cilíndrico, comprimido entre duas chapas planas, é aqui apresentada. Este estudo, está baseado na teoria de contato de Hertz, [He 96]. Timoshenko e Goodier [TG 70], derivaram uma expressão para as tensões de contato que surgem em um cilindro comprimido entre duas chapas planas. Entretanto, a aproximação mais direta foi apresentada por Shtaerman [Sh 49], Poritsky [Po 50], e DePater [De 60]. Poritsky apresentou uma expressão geral para a deformação "a", na superfície de contato entre cilindros submetidos a ação de cargas normais mas não entrou na determinação da distribuição de tensão.

$$a = -2(k_1 + k_2) \int_{-b}^b q(s) \ln\left(\frac{r}{R}\right) ds + C_x^2 \quad [4.10]$$

Onde: a = deformação total nos dois cilindros, [mm]

b = metade da largura de contato (limites de integração)

$q(s)$ = pressão num ponto devido a carga aplicada [N/mm²]

r = distância entre uma área infinitesimal em "s" e o ponto de observação, (ver figura 4.10)

R = raio do cilindro, [mm]

$k_i = (1 - \mu_i^2) / \rho_i E_i$ onde E_i e μ_i são respectivamente, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para os dois cilindros, $i = 1, 2$.

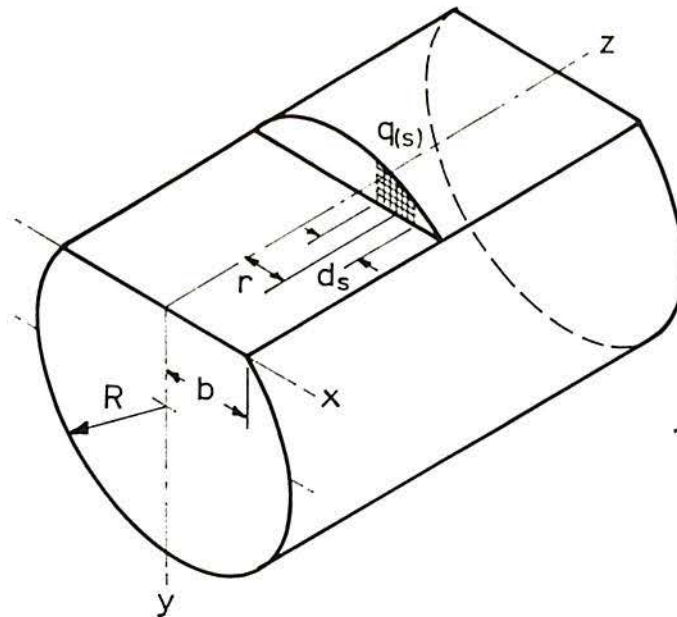


Figura 4.10 - Notação básica para a deformação de um cilindro.

Hertz mostrou que a intensidade de tensão sobre a área de contato pode ser expressa por:

$$q(s) = \frac{2P}{\pi b^2} \sqrt{b^2 - s^2} \quad |s| < b \quad [4.11]$$

Onde:

s = Área infinitesimal,

$q(s)$ = Pressão num ponto devido a carga aplicada,

P = Força compressiva entre os cilindros por unidade de comprimento [N/mm],

$2b$ = Largura de contato [mm], ver figura 4.6.

Uma distribuição de tensões deste tipo, produz um deslocamento na forma $(a-Cx^2)$ em cada cilindro, permitindo a avaliação de "a" e C na equação [4.11].

Föppl [Fo 22] analisou o problema do contato para uma amostra cilíndrica comprimida entre duas chapas planas e paralelas, considerando que a distribuição da pressão sobre a área de contato era dada pela equação,

$$q(s) = \frac{2P}{\pi b^2} [b^2 - s^2] \quad [4.12]$$

Onde:

$q(s)$ = Pressão num ponto devido a carga aplicada $[N/mm^2]$,

P = Força de compressão,

$2b$ = Largura de contato $[mm]$, ver figura 4.5,

s = Área infinitesimal.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos utilizados neste trabalho apresentavam originalmente, geometrias diversas; desde pastilhas para usinagem de metais, tipo triangular, redonda e quadrada, além de um pistão de bomba classificado como componente de máquina. Dada esta diversidade na geometria das peças utilizadas para a confecção dos corpos de prova foi realizado um programa de usinagem das amostras, levando-se em conta: suas origens, durezas e dimensões, conforme mostrado na tabela 3.1. Isto se fez necessário, visto que o teste de compressão diametral estabelece que os corpos de prova sejam cilíndricos.

Para isso as diversas amostras de materiais cerâmicos foram devidamente cortadas, desbastadas, retificadas e finalmente polidas. Enfatizamos que todo o processo de usinagem realizado nos materiais cerâmicos, estes utilizados para confeccionar os corpos de prova, foram realizados com ferramentas especiais tais como: discos e rebolos diamantados além do nitreto de boro cúbico-CBN e pasta diamantada para proceder o polimento final. Quanto às máquinas operatrizes, foram utilizadas para as operações de desbaste e retificação circular uma retífica universal com algumas modificações que se fizeram necessárias. Já, para as operações de corte, desbaste e retificação plana recorreremos a uma máquina utilizada para a preparação de amostras geológicas. Esta máquina por sua vez passou por uma completa reforma para entrar em operação e além de alterações nas velocidades de avanço e corte, assim como a redução de vibrações mecânicas em função das cerâmicas serem de elevada dureza e de baixa tenacidade. Sempre que a quantidade do material era suficiente procurou-se confeccionar lotes em número de cinco unidades, tendo entretanto, as dimensões D e L diferenciadas. Com isso buscou-se verificar a influência destas dimensões D e L, nos resultados obtidos com os testes de compressão diametral. Ainda, no final deste capítulo, é apresentado uma Análise por Elementos Finitos - FEM nos ensaios de flexão a três pontos e compressão diametral.

5.2 USINAGEM DOS MATERIAIS CERÂMICOS

De um modo geral, a usinagem dos materiais cerâmicos exige bastante atenção, devido à sua elevada dureza e baixa tenacidade. Durante o

desenvolvimento do presente estudo, ainda não tínhamos as máquinas e ferramentas específicas necessárias para a usinagem dos materiais cerâmicos escolhidos, todos eles considerados de extrema dureza. Esta característica intrínseca dos materiais estudados dificultou a possibilidade de produzir com rapidez uma maior quantidade de geometrias diferenciadas. Entretanto, a necessidade nos conduziu às máquinas operatrizes convencionais que, com algumas modificações e adaptações, permitiram que fossem confeccionados os corpos de prova, apesar do trabalho ser lento em função das limitações operacionais.

5.2.1 CORTE

Dada a elevada dureza e também a fragilidade destes materiais torna-se difícil a eliminação das rebarbas e lascamento durante o corte e, principalmente no final desta operação pois, a parte não fixada, a qual ficava em balanço, não era totalmente seccionada resultando sempre em lascamento. Este lascamento em final de corte ocorria devido à vibração imposta pela própria ferramenta, visto que o disco diamantado utilizado para este fim é multicortante; ou seja, o gume cortante é intermitente, formado por uma infinidade de partículas de diamante. Durante esta operação de corte, ainda na fase de teste, foram utilizadas diversas velocidades de corte mas sem, no entanto, se conseguir eliminar as vibrações e o conseqüente lascamento no final desta operação. Para contornar este problema de lascamento, os corpos de prova foram colados sobre uma pequena lâmina de vidro com espessura de 2 mm e dimensões de 30 x 45 mm, as

quais eram fixadas através de um sistema de sucção, sendo após embutidos com uma resina adequada. Portanto, para realizar a operação de usinagem nos diversos materiais cerâmicos foram necessárias as seguintes etapas:

- - montagem da peça colada sobre uma base tipo lâmina de vidro,
- - embutimento da mesma com resina epoxi ou acrílica, para eliminação das rebarbas em final de corte,
- - desmontagem da base,
- - montagem em uma base metálica de seção circular,
- - desbaste até o formato cilíndrico em retífica tipo universal e após operação de polimento do cilindro,
- - corte do cilindro após o seu polimento total,
- - retífica da superfície transversal do cilindro cortado na operação anterior.
- - polimento mecânico/manual realizado com pasta diamantada.

Todas as operações de corte, desbaste e retificação plana foram executadas em uma máquina para preparação de amostras geológicas Marca Micropetralab, Modelo 1.106-B. Esta máquina, entretanto, foi adaptada para proceder a usinagem dos materiais cerâmicos utilizados neste estudo com modificações que permitissem alterações nas suas velocidades de corte e avanço, parâmetros estes, em conformidade com as ferramentas adequadas.

5.2.2 EMBUTIMENTO

Por tratar-se, normalmente, de amostras de pequenas dimensões, tornou-se necessário que as mesmas fossem embutidas, isto é, envolvidas em algum tipo de resina para facilitar o seu manuseio junto aos dispositivos de fixação para após serem usinadas. Para isso foram selecionadas, dentro de uma variedade de colas e resinas existentes no mercado, três tipos básicos de adesivos. Os mesmos atenderam plenamente as nossas necessidades de fixação e embutimento das peças e/ou corpos de prova nos dispositivos para o manuseio das diversas amostras cerâmicas durante as operações de corte, desbaste, retificação e polimento. Esta técnica, juntamente com os parâmetros desenvolvidos para o processo de usinagem, permitiram a repetibilidade na qualidade final em termos de acabamento superficial. A seguir apresentamos as colas e resinas por nós selecionadas:

- - Adesivo instantâneo (a base de cianoacrilato), de baixa viscosidade, usado para o posicionamento e fixação da amostra na lâmina de vidro, ver figura 5.1;
- - Resina tipo epoxi ultra-rápida, usada também para posicionamento e fixação da barra cerâmica em base metálica no torneamento dos cilindros, ver figura 5.2;
- - Resina acrílica, utilizada para envolver, ou seja, para embutir a amostra após o seu posicionamento na lâmina de vidro para que fossem executadas as operações de corte e polimento, ver figura 5.3.

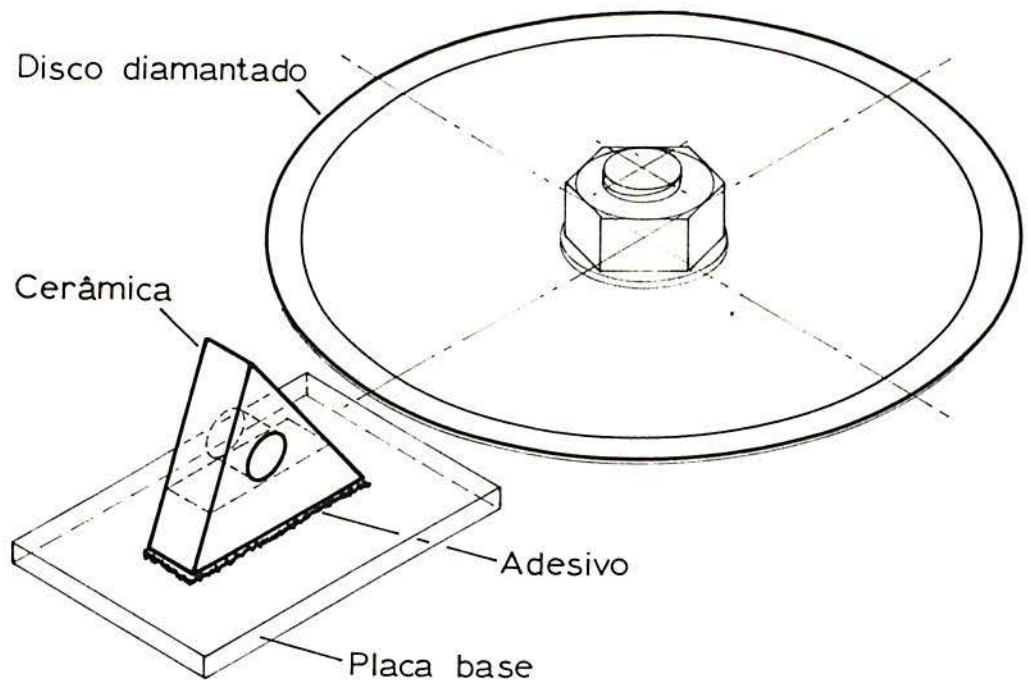


Figura 5.1 Pastilha de material cerâmico colada sobre lâmina de vidro para ser cortada por disco diamantado.

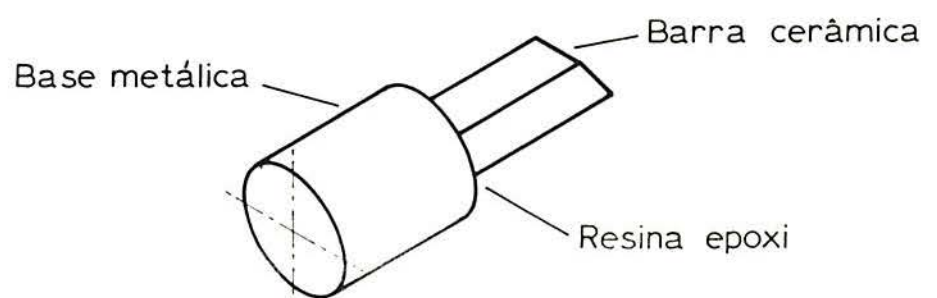


Figura 5.2 - Barra com seção quadrada obtida do corte realizado numa pastilha de material cerâmico e montada em uma base metálica de seção circular para a operação de torneamento.

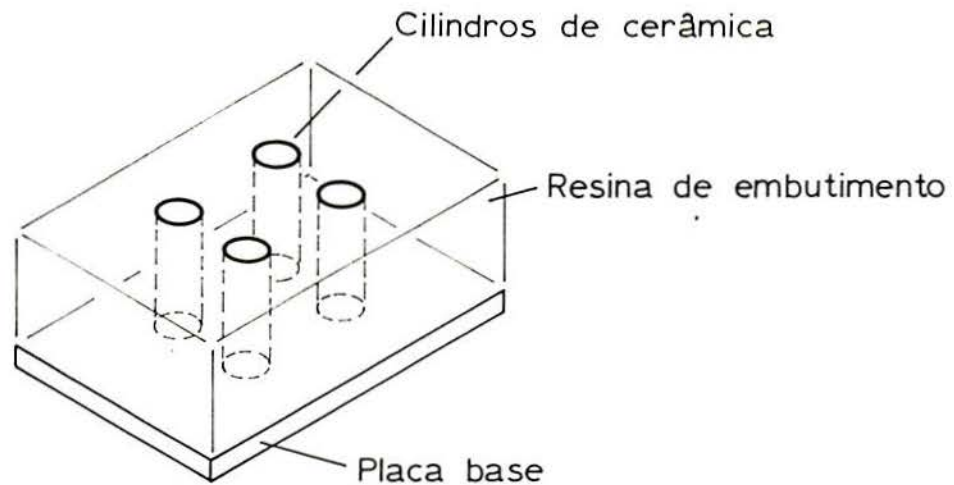


Figura 5.3 Cilindros de material cerâmico obtidos pela operação de torneamento, vide figura 5.2, colados e embutidos com resina em uma lâmina de vidro para serem cortados e polidos.

5.2.3 MÁQUINA DE CORTE, DESBASTE E POLIMENTO

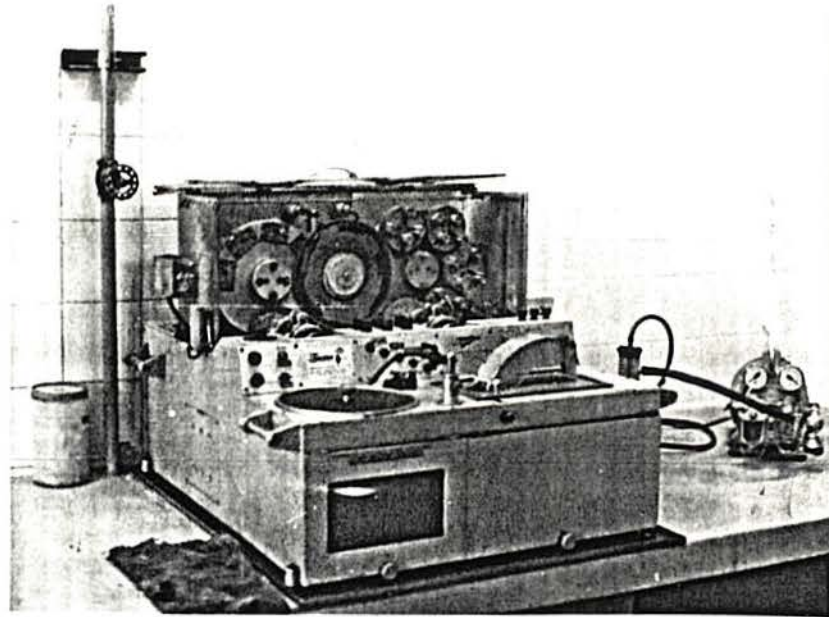
Para realização das operações de usinagem nos materiais cerâmicos estudados, foi utilizada uma máquina para corte e polimento de rochas marca Micropetralab, Modelo 1.106-B, ver figura 5.4. Esta máquina foi, entretanto, adaptada às necessidades, principalmente, no que concerne ao controle de vibrações uma vez que esta é determinante na qualidade final da usinagem. Outro controle importante foi o da variação da velocidade de avanço conseguido com uma pequena caixa de engrenagens. Já a velocidade de corte foi controlada pela rotação do motor principal através da sua alimentação em corrente contínua.

Com estes controles, havia a possibilidade de alterações nos

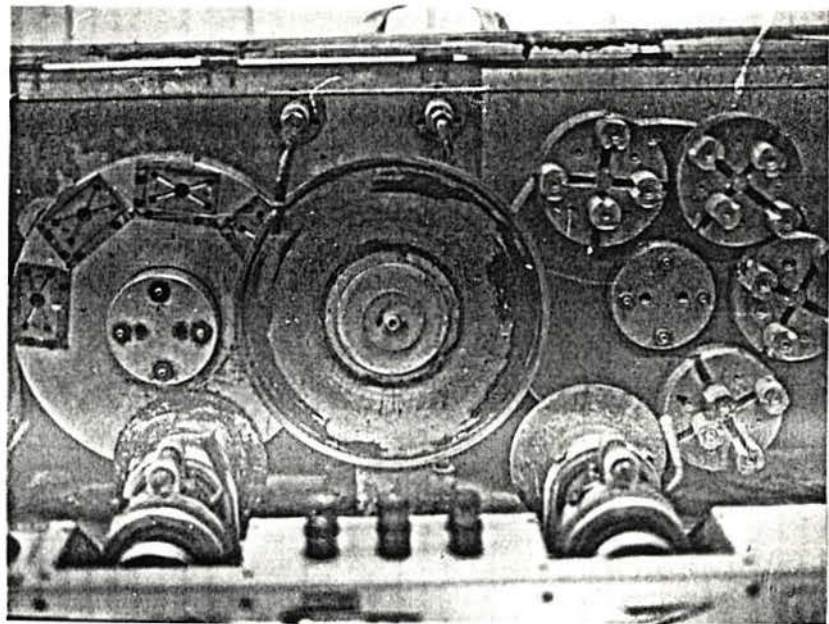
parâmetros de usinagem e contando também com o uso de ferramentas especiais como: discos diamantados para cortes super finos, rebolos para desbaste e polimento impregnados com diamante e/ou com nitreto de boro cúbico-CBN. Assim, foram confeccionados uma variedade de corpos de prova com as dimensões e acabamento requeridos. Tanto a operação de corte como a de polimento foram sempre executadas com refrigeração abundante.

5.2.4 POLIMENTO

Trata-se da operação final de acabamento das faces do corpo de prova. Nesta operação é definida a espessura do corpo de prova, ou seja, a sua dimensão L , assim como a sua rugosidade superficial. Inicialmente, as peças foram cortadas em barras de seção quadrada, conforme mostra figura 5.1, e após embutidas com resina epoxi numa base metálica de seção circular, conforme mostra a figura 5.2. Esta base circular metálica era fixada pelas castanhas da placa de uma retífica cilíndrica universal. Com um rebole de nitreto de boro cúbico-CBN, com granulometria DIN/FEPA D181 e refrigeração abundante, era realizada a usinagem de desbaste. Próximo da medida final, trocava-se o rebole, também de CBN, com granulometria DIN/FEPA D64, dando o polimento final com uma rugosidade adequada e também definindo o diâmetro nominal, (classificação de granulometria em rebolos para trabalhos mecânicos, recomendação da Norma DIN 848). Ainda, com a peça presa, era executada a operação de faceamento na extremidade livre e com isso definia-se a face de referência, para finalmente proceder ao corte dos corpos de prova.



(a)



(b)

Figura 5.4 - (a)- Vista geral da máquina utilizada para as operações de corte, desbaste e polimento de rochas, modificada para confeccionar os corpos de prova dos materiais cerâmicos estudados e classificados como extra duros. (b)- Detalhe mostrando: no plano do fundo os cabeçotes para fixação das amostras e no plano da frente o disco de corte e os rebolos de desbaste e polimento.

5.3 ENSAIOS

O objetivo deste trabalho foi o estudo e o desenvolvimento experimental do ensaio de compressão diametral para avaliá-lo na caracterização da resistência dos materiais cerâmicos de pequenas dimensões. Entretanto, foram utilizados outros métodos, os tradicionalmente utilizados, sempre que necessário no intuito de compararmos os resultados finais.

5.3.1 ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

O ensaio de flexão a três pontos é realizado em materiais frágeis com elevada dureza. Os resultados possuem um caráter qualitativo e não quantitativo do ponto de vista de projeto. O corpo de prova é submetido a uma carga de flexão onde a deformação resultante é muito pequena para uma dada tensão aplicada. A ruptura se dá repentinamente possibilitando a determinação da "resistência à ruptura transversal".

Nos materiais cerâmicos, os ensaios mecânicos que têm significado são a dureza e a resistência à ruptura transversal. São empregados corpos de prova de forma retangular, conforme a Norma ASTM B406-76. Esta norma recomenda o emprego de um dispositivo com dois apoios situados a uma distância " l ", conforme mostra a figura 5.6, onde o carregamento é aplicado no centro, ou seja, a distância " $l/2$ " de cada apoio, conforme mostra a figura 5.5.

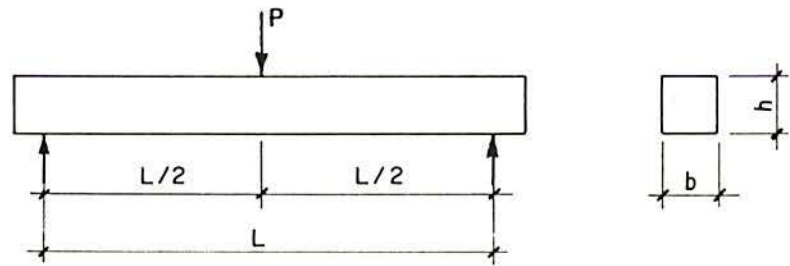


Figura 5.5 - Dimensões de um corpo de prova para o ensaio de flexão a três pontos.

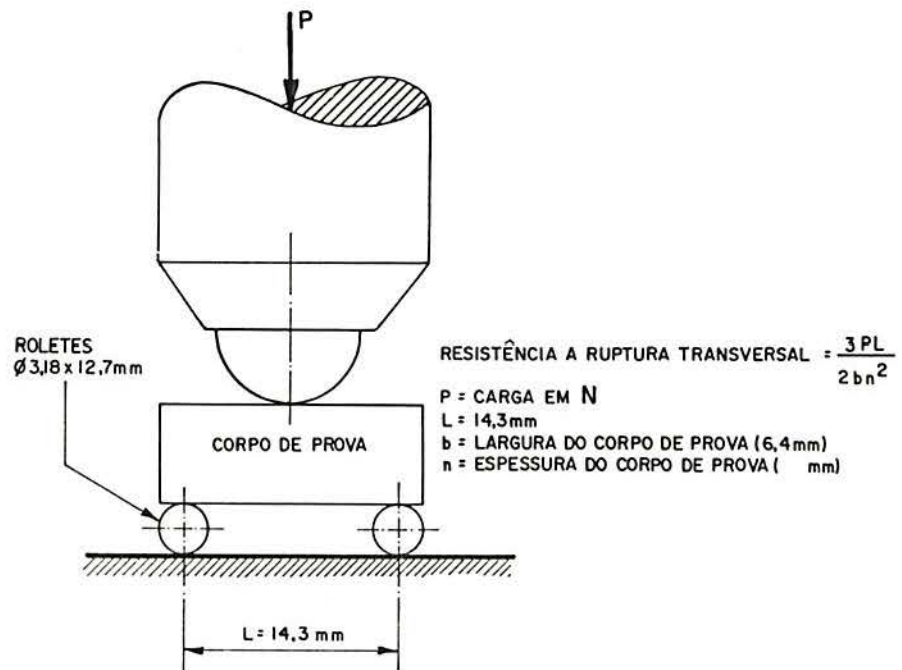


Figura 5.6 - Disposição geométrica do corpo de prova no dispositivo segundo a Norma ISO 3327-75, para determinação da resistência à ruptura transversal.

Desta forma determinamos a resistência à ruptura transversal ou "módulo de ruptura", através da equação:

$$M_r = \frac{M c}{J} \quad (5.1)$$

onde:

M_r = módulo de ruptura transversal (MPa),

M = momento de resistência, relativo à carga P e a distância $l/2$,

c = distância do eixo neutro (mm),

J = momento de inércia da seção (mm⁴).

$$\text{como: } M = \frac{P l}{4} \quad (5.2)$$

$$J = \frac{b h^3}{12} \quad (5.3)$$

(para uma seção retangular de base " b " e altura " h ").

Reescrevendo a equação 5.1 temos que:

$$M_r = \frac{3}{2} \left[\frac{P l}{b h^2} \right] \quad (5.4)$$

Assim, neste ensaio podemos medir a flecha através de um defletômetro, o que permite a obtenção de um diagrama *carga X deflexão*, conforme a figura 5.7.

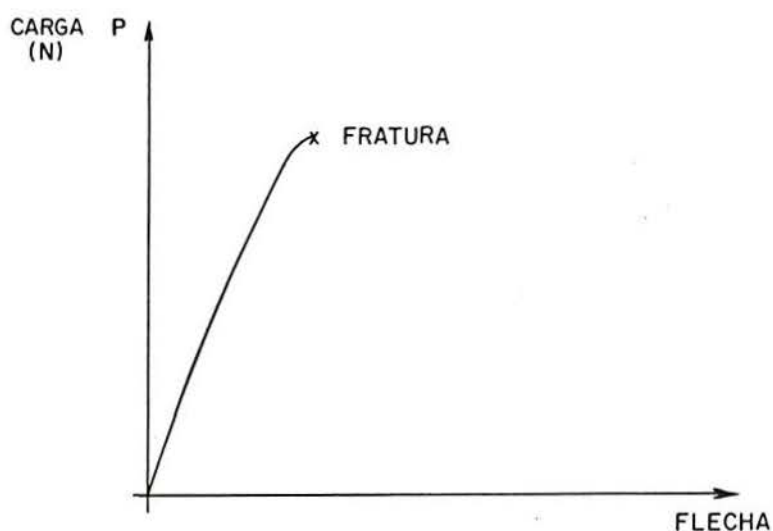


Figura 5.7 - Diagrama *carga X deflexão* típico de um material frágil.

O ensaio de ruptura transversal é relativamente simples. Entretanto, os corpos de prova para a sua realização necessitam atender a um controle dimensional rigoroso. Os resultados deste ensaio podem ser afetados por vários fatores como: comprimento " l " do vão entre apoios, velocidade de carregamento e dimensões da seção transversal do corpo de prova. No sentido de atender as especificações necessárias, seguimos as recomendações das normas citadas para a confecção dos corpos de prova e a realização dos respectivos ensaios.

5.3.2 INDENTAÇÕES

Os ensaios normalmente utilizados para a determinação da tenacidade dos materiais cerâmicos apresentam um grande inconveniente para a sua execução, isto devido a complexa geometria dos corpos de prova assim como o grande volume de material necessário para a sua realização.

Neste trabalho também utilizamos o método de ensaio "**DCM - Direct Crack Measurement**", para validá-lo na determinação da tenacidade dos materiais cerâmicos que apresentam uma maior tenacidade, como o metal duro testado com teores crescentes de cobalto em suas composições, conforme mostra a tabela 3.2. As indentações Vickers feitas para a determinação da tenacidade dos materiais cerâmicos, foram realizadas em um durômetro Marca Wolpert, Modelo Dia-Testor 2Rc. A escala de cargas variaram de 10 a 30 kgf e foi determinada pela tenacidade dos materiais testados. Após a realização das indentações, as mesmas foram examinadas (visualizadas), em um Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV, marca Cambridge, modelo Stereo Scan 500, para a determinação dos tamanhos das trincas geradas.

5.3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

O estudo na área de caracterização mecânica de diversos materiais e produtos tem tido um crescente interesse tanto ao nível de pesquisa em novos

materiais como na certificação de produtos acabados processados pela indústria. Hoje, com a visão de qualidade integral aonde são considerados aspectos de confiabilidade da matéria prima, repetibilidade no processo de fabricação assim como o custo desse em função do dispêndio de energia envolvido, nos parece que cada vez mais se faz necessário a flexibilização também na certificação de materiais, processos e conseqüentemente dos produtos manufaturados pelos meios produtivos. Dentro desta realidade necessária, este trabalho foi desenvolvido de uma forma experimental visto que o ensaio de compressão diametral apresenta-se como uma boa alternativa de teste na determinação das propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos em geral. No Brasil, entretanto, esta técnica, ensaio de compressão diametral ou "TESTE BRASILEIRO", que é normalizado pela ABNT MB-212/58 e NBR 7222/83 e utilizado exclusivamente para a determinação de propriedades mecânicas de argamassas e concretos, como a resistência mecânica à tração obtida de forma indireta através do referido método. Já ao nível internacional segundo pesquisa bibliográfica, isto ficou evidente nas publicações especializadas que o método ensaio de compressão diametral, vem sendo amplamente empregado e utilizado no controle de qualidade de produtos em diversas áreas industriais conforme está apresentado no capítulo anterior, item 4.5.1.

5.4 ANÁLISE DE TENSÕES - Via Método de Elementos Finitos

Na cerâmica " Al_2O_3 - Alumina para Indústria Química", foram realizados ensaios de flexão a três pontos e também ensaios de compressão diametral,

conforme resultados apresentados na Tabelas 6.1; 6.17; 6.18 e 6.19. Com o objetivo de obter uma melhor visualização na distribuição das tensões nos corpos de prova dos referidos ensaios durante a aplicação da carga, utilizamos o software "Algor Inc.", para uma análise pelo Método de Elementos Finitos - FEM.

Esta análise via Método de Elementos Finitos, consiste em avaliar o comportamento de uma peça submetida a uma solicitação, a qual é dividida em pequenas regiões. Assim, o resultado global é feito pela união destas regiões através dos pontos chamados de nós, estabelecendo os respectivos contornos e com isso caracterizando uma área que configura a geometria da peça solicitada.

De uma forma geral, qualquer peça a ser analisada tem inicialmente a sua geometria gerada por meio do CAD do próprio software ou outro como o AutoCAD, pois o ALGOR possui interface que possibilita a importação/exportação de desenhos. Desta forma, procede-se após desenhar a geometria básica da peça, a geração da malha que consiste na divisão da estrutura em pequenos elementos. A forma e tamanho dos elementos gerados é definida em função da geometria e do tipo de estrutura modelada que atendam as condições de contorno como graus de liberdade, direções dos carregamentos e áreas das superfícies de contato que vão se dar através dos nós da malha gerada. Com as restrições previamente definidas, como pontos de engastamento e local de carregamento, são realizados os cálculos levando-se em conta as propriedades do material testado e assim, resultando em uma simulação das regiões tensionadas segundo as condições reais do teste experimental. Como resultado final, obteve-se na peça previamente desenhada o perfil da estrutura deformada através dos deslocamentos dos nós com as tensões principais trativas e compressivas segundo o critério utilizado, Von Mises, Tresca ou outro qualquer.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Em se tratando de um trabalho experimental envolvendo materiais de alta dureza foi necessário equacionar as dificuldades para a preparação dos corpos de prova. Contudo, no presente estudo foram desenvolvidas técnicas de manuseio das amostras cerâmicas além, de adaptações das máquinas operatrizes disponíveis para a usinagem dos materiais cerâmicos estudados. Resolvidos os problemas de usinagem dos materiais cerâmicos em estudo restava, ainda, o desenvolvimento de técnicas necessárias para executar o ensaio de compressão diametral, uma vez que tratavam-se de amostras de pequenas dimensões e, a

bibliografia consultada não fazia referência da operacionalização do referido ensaio.

Assim, iniciou-se a fase experimental deste estudo com a realização de diversos ensaios de compressão diametral em materiais cerâmicos comuns, sem a preocupação de caracterizá-lo mas sim, para estabelecer uma rotina desta técnica e verificar a sua repetibilidade. Os resultados iniciais não foram repetitivos conforme indicavam as referências bibliográficas. Passou-se então a ensaiar lotes com cinco corpos de prova, sendo que entre os lotes variá-va-se as dimensões D e L , diâmetro e espessura, respectivamente.

A repetibilidade continuou não ocorrendo e concluiu-se que o equipamento utilizado não apresentava as condições técnicas necessárias para a realização do ensaio de compressão diametral, em virtude das amostras testadas serem de pequenas dimensões. Isto foi equacionado com um dispositivo tipo "Bigorna de Bridgman", projetado e construído com o propósito específico de permitir uma boa rigidez, assim como o perfeito alinhamento axial da aplicação da carga durante a realização do ensaio conforme mostrado na figura 4.7.

A seguir, descreve-se a parte operacional da preparação micrográfica, polimento e ataque, necessários para cada tipo de cerâmica estudada. Também é feita a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios de flexão a três pontos e nos ensaios de compressão diametral. Estes resultados estão apresentados na forma de tabelas visando atender a recomendação da Norma ASTM B406 - 76/90, no que concerne ao tratamento estatístico.

6.2 POLIMENTO

Os resultados dos ensaios de flexão a três pontos e dos ensaios de compressão diametral, comprovaram o sucesso das ferramentas utilizadas para corte, desbaste e polimento mecânico dos corpos de prova. Isto foi verificado pela repetibilidade dos resultados numéricos num volume total de mais de trezentas amostras ensaiadas. Quanto ao polimento, foi sempre realizado com parâmetros pré estabelecidos sendo empregado pasta diamantada para uniformizar o acabamento superficial das amostras.

6.3 CERAMOGRAFIA

A seguir é apresentado um conjunto de micrografias que foram observadas ao MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura e também ao microscópio ótico referentes ao metal duro, perfazendo as quatro classes estudadas HF, NHA, HA e MPD2. Estas amostras foram polidas mecanicamente com pasta diamantada de até $0,3 \mu m$ e após, foram submetidas a um ataque eletrolítico em solução de Hidróxido de Potássio (KOH). As duas aluminas estudadas "Al₂O₃ - WC" e de alta alumina "Al₂O₃ - 90%" assim, como o "Si₃N₄ - Nitreto de Silício", receberam somente os polimentos pois, não necessitaram ser submetidas a qualquer tipo de ataque químico.



Figura 6.1 - Metal duro, **classe HA** visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 5000 X. Ataque eletrolítico (KOH).

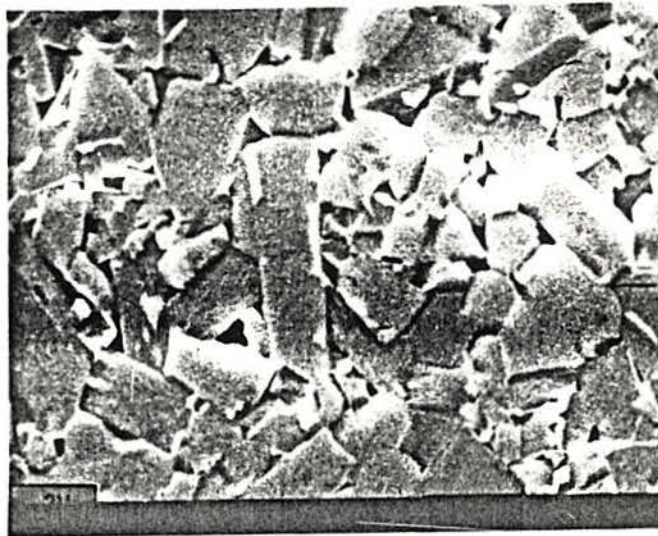


Figura 6.2 - Metal duro, **classe HA** visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 10000 X. Ataque eletrolítico (KOH).

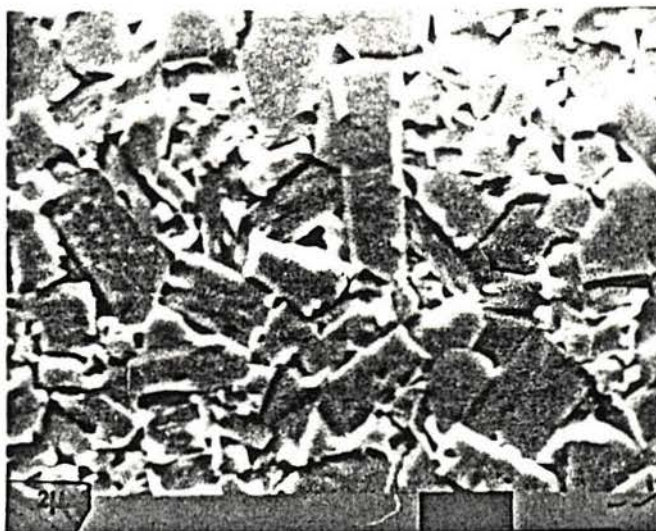


Figura 6.3 - Metal duro, classe HA visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 10000 X. Ataque eletrolítico (KOH).



Figura 6.4 - Metal duro, classe HA visualizado ao MEV- Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 10000 X. Ataque eletrolítico (KOH).

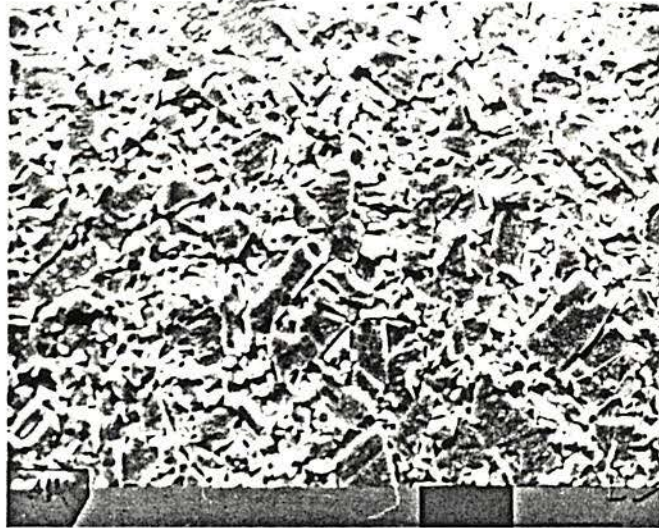


Figura 6.5 - Metal duro, **classe HA** visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 5000 X. Ataque eletrolítico (KOH).



Figura 6.6 - Metal duro, **classe NHA** visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 10000 X. Ataque eletrolítico (KOH).

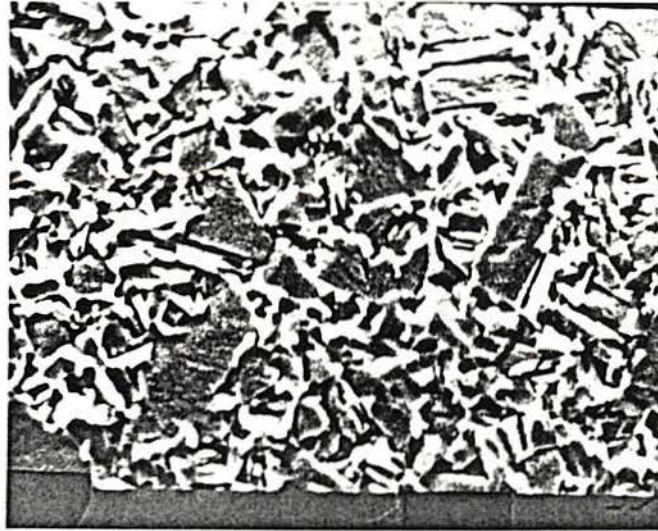


Figura 6.7 - Metal duro, **classe NHA** visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 5000 X. Ataque eletrolítico (KOH)

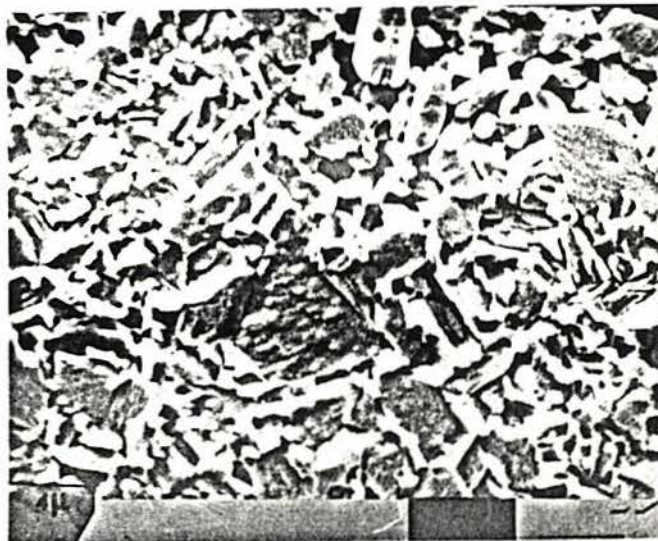


Figura 6.8 - Metal duro, **classe NHA** visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 5000 X. Ataque eletrolítico (KOH).



Figura 6.9 - Metal duro, **classe MPD2** visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 5000 X. Ataque eletrolítico (KOH)

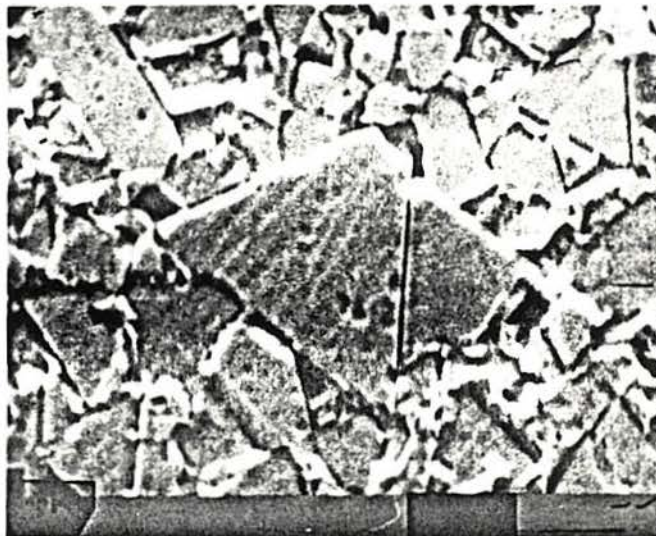


Figura 6.10 - Metal duro, **classe MPD2** visualizado ao MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura com aumento de 5000 X. Ataque eletrolítico (KOH).

6.4 INDENTAÇÕES

Neste trabalho buscou-se verificar também a validade da técnica de ensaio "DCM - Direct Crack Measurement", para teste de materiais cerâmicos que apresentassem um maior grau de tenacidade. Este foi o caso das quatro classes do metal duro com teores crescentes de cobalto em suas composições, conforme mostra a tabela 3.2. Esta técnica de ensaio foi também aplicada aos dois tipos de Alumina e ao Nitreto de Silício. As indentações foram produzidas nas superfícies das amostras previamente polidas, nas condições já citadas, com um durômetro marca Wolpert, modelo Dia-Testor 2Rc.

As cargas utilizadas para a geração das trincas foram diversas sendo que para os materiais de maior tenacidade, variou de 10 a 30 kgf. Após a realização das Indentações as superfícies foram examinadas e fotografadas em um microscópio eletrônico de varredura - MEV, marca Cambridge, modelo Stereo Scan 500, para a determinação do tamanho das trincas geradas. Na figura 6.11, apresenta-se um gráfico com a média dos resultados de tenacidade e pode-se observar que as duas cerâmicas (Al_2O_3 e Si_3N_4) e as classes de metal duro com menor quantidade de cobalto, apresentaram resultados de K_{IC} dentro de uma faixa típica para materiais cerâmicos.

Já na figura 6.12 é mostrado uma curva da variação do valor de K_{IC} que resultou das quatro classes de metal duro com os respectivos teores crescentes de cobalto testados pela técnica do ensaio DCM. Pode-se constatar, entretanto, valores muito elevados de K_{IC} para aquelas classes com elevados teores de cobalto, pois este inibe a propagação de trincas, nas quais, este método é baseado.

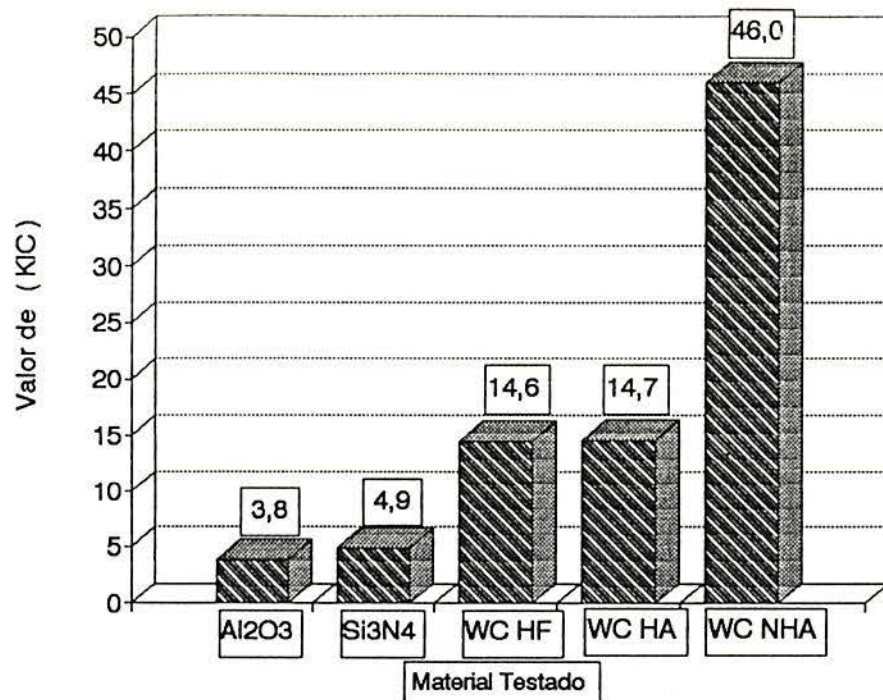


Figura 6.11 - Valores médios de K_{IC} encontrados para os diferentes materiais estudados pela Técnica "DCM - Direct Crack Measurement".

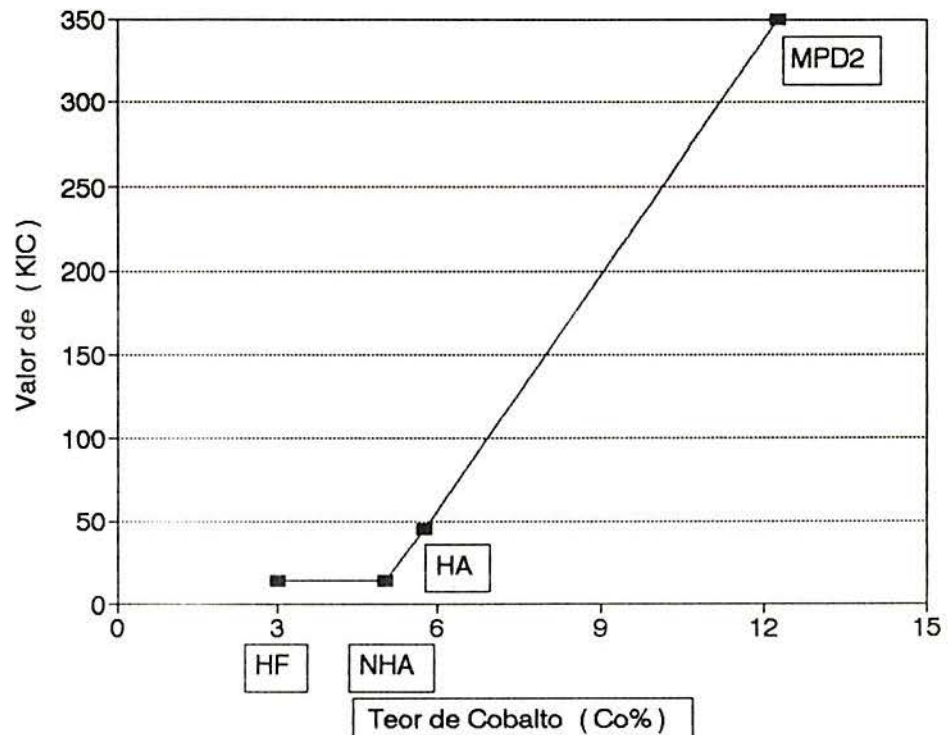


Figura 6.12 - Variação do valor de K_{IC} para diferentes classes de WC-Carbeto de Tungstênio com crescentes teores de cobalto estudados pela Técnica "DCM - Direct Crack Measurement".

6.5 ENSAIOS DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

Em um dos materiais estudados, "Al₂O₃ - Alumina para Indústria Química", realizou-se o ensaio de flexão a três pontos. Os corpos de prova foram usinados atendendo as exigências das Normas citadas. Para a realização dos ensaios de flexão a três pontos, utilizou-se uma máquina universal de ensaios marca MTS, modelo 10 TZZ 707/1978, classe 1, segundo norma DIN 51220, instrumentada com uma célula de carga marca MTS, modelo 500 N 1%. Na tabela 6.1 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios de flexão a três pontos realizados na "Al₂O₃ - Alumina Para Indústria Química", com as respectivas dimensões de cada corpo de prova.

Corpo de Prova Número	Dimensões em (mm) (h)	(b)	Carga (N)	σ_{RF} (Mpa)
01	6,31	4,96	118	12,8
02	6,31	4,96	72	7,8
03	6,35	4,97	100	10,7
04	6,31	4,97	98	10,6
05	6,30	4,97	119	12,9
06	6,30	4,96	93	10,1
07	6,31	5,06	22	2,3
08	6,31	5,06	21	2,2
09	6,31	5,06	93	9,9

6.6 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para a realização dos ensaios de Compressão Diametral ou "TESTE BRASILEIRO", utilizou-se uma máquina universal de ensaios marca Wolpert, modelo ZD10/1968, classe 1, segundo norma DIN 51220, instrumentada com uma célula de carga - tipo membrana modelo 10 kN 1%. A seguir apresenta-se os resultados dos ensaios de compressão diametral realizados nos diversos materiais cerâmicos estudados. Estes resultados estão agrupados em tabelas contendo lotes com cinco ensaios para cada tipo de material estudado e as suas respectivas dimensões. O tratamento estatístico utilizado para a apresentação dos resultados dos ensaios de compressão diametral segue a recomendação da Norma ASTM B406 - 76/90, que também é utilizada para o ensaio de flexão (ruptura transversal), na caracterização de materiais frágeis. Segundo esta Norma os corpos de prova devem satisfazer requisitos dimensionais, de acabamento e com taxa de carregamento conforme comentado no capítulo 5, item 5.3.1 e recomenda: - devem ser utilizados lotes com o mínimo de cinco corpos de prova para ensaiar cada tipo de material cerâmico testado; - os resultados são apresentados na sequência e forma explicadas abaixo:

- a) inicialmente determina-se a resistência à ruptura por compressão diametral de cada corpo de prova em um lote de cinco amostras,
- b) calcula-se a média aritmética entre os valores obtidos no item "a",
- c) determina-se o desvio entre cada valor encontrado e a respectiva média calculada para as cinco amostras,
- d) um dos cinco corpos de prova, aquele que apresentar o menor valor, poderá não ser considerado se:

- *o desvio existente entre o valor encontrado para o corpo de prova a ser descartado e a média (calculada agora entre os quatro maiores valores), for maior que a soma de todos os desvios existentes entre as outras quatro amostras, com relação a essa mesma média. Se isso não ocorrer, o corpo de prova de piores propriedades, não poderá ser desconsiderado, computando-se assim a média para os cinco corpos de prova testados, conforme mostrado na tabela 6.2.*

Essas considerações estatísticas foram feitas em todos os resultados dos ensaios realizados e estão apresentados nas tabelas de 6.4 a 6.19.

Uma tendência mais moderna, aceita e recomendada na previsão de propriedades de falhas para pequenas amostras de materiais frágeis, como é o caso dos materiais cerâmicos aqui estudados, é o de enquadrar os resultados segundo uma distribuição de Weibull [P 62], [B 64].

O resultado final do enquadramento segundo esta distribuição permitirá afirmar com certa margem de acerto, qual a probabilidade de que uma amostra venha a romper diante de uma solicitação de tensão pré-estabelecida.

A seguir apresenta-se um exemplo com os dados obtidos no ensaio de compressão diametral da "Al₂O₃-Alumina Para Ferramenta de Corte", onde serão aplicados os critérios estatísticos previstos pela Norma ASTM B406 - 76/90 e usando a distribuição de Weibull, para a associação que resultou entre suas propriedades. Os valores encontrados nos ensaios de resistência à compressão diametral, em ordem crescente, são: 278 MPa; 280 MPa; 282 MPa; 288 MPa e 309 MPa. Segundo a teoria da distribuição de Weibull (Apêndice 1), pode-se elaborar a tabela 6.2 apresentada a seguir.

Tabela 6.2 - Exemplo da apresentação dos resultados de ruptura aplicando os critérios previstos pela Norma ASTM B406 - 76/90 a distribuição de Weibull. Os valores usados neste exemplo, tensão de ruptura, resultam do teste da "Al₂O₃ - WC" utilizada como ferramenta de corte, obtidos através do ensaio de compressão diametral.

Valor da resistência à ruptura por compressão diametral (MPa)	Desvio com relação à média X_4	
278	12	
280		10
282		8
288		2
309		19
$X_4 = 290$ $X_5 = 287$	Soma dos desvios dos 4 melhores = = 39 > 12	

Onde:

$X_4 = 290$ (MPa), média aritmética entre os 4 melhores resultados;

$X_5 = 287$ (MPa), média aritmética entre os 5 valores encontrados;

Nesse caso o corpo de prova cuja resistência à ruptura por compressão diametral foi 278 não deve ser descartado e a média segundo a Norma é $X_5 = 287$ MPa.

Para a aplicação da distribuição de Weibull, usou-se uma escala variando entre 250 MPa e 350 MPa. Considerou-se a frequência percentual de ocorrência como sendo: $F(X_i) = i / (n+1)$.

Isso, por tratar-se de lotes com até cinco amostras. Também, foi considerado um intervalo variando de 20 em 20 MPa, tomando-se o termo médio entre dois pontos. Dentro da faixa adotada, a ocorrência de ruptura da amostra será associada à frequência percentual e o valor $F(x)$, para a percentagem que expressa a probabilidade de ruptura da amostra, com valores menores ou iguais a um determinado valor considerado (função de distribuição acumulada). Isto permite agrupar esses dados conforme apresentado na tabela 6.3. Para completar a tabela 6.3 onde denomina-se as colunas de (Y) e $F_w(X_i)$, são efetuadas as seguintes considerações:

- a) **Coluna (Y) :** *Para a obtenção dos valores desta coluna, basta associar aos valores do intervalo compreendido entre 250 MPa e 350 MPa, valores que sejam correspondentes, dentro das décadas previstas no nomograma de Weibull, vide figura 6.14.*

Arbitrariamente, associa-se o valor mínimo da escala 250 MPa ao valor 2 e o valor máximo 350 MPa ao valor 42. Assim, usando-se a semelhança de triângulos ao sistema de eixos cartesianos conforme mostra a figura 6.13, tem-se:

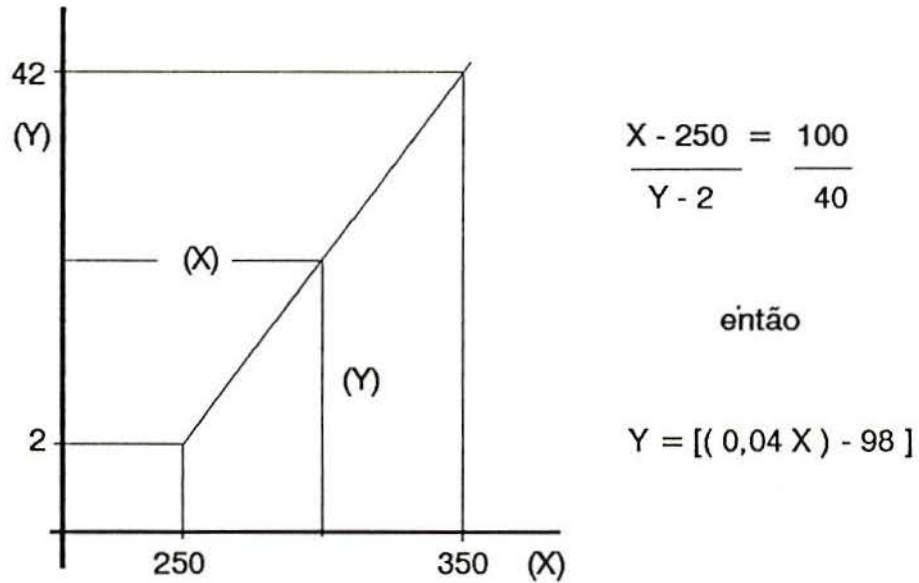


Figura 6.13 - Desenho esquemático apresentando a semelhança de triângulos em um sistema de eixos cartesianos.

Desta forma, com os valores de X associam-se os valores de Y e assim preenchemos a coluna (Y) da tabela 6.3.

b) Coluna $F_w(X)$: Associando-se os valores de (Y) às frequências percentuais de ocorrência, acaba-se por obter na figura 6.14 (nomograma) a curva "A", que neste caso particular mais se assemelha a uma reta e coincide com a reta "B", conforme pode-se verificar no apêndice 1.

Isto quer dizer que neste caso $Y=0$. Considerando-se esta distribuição obtém-se da figura 6.14:

$$D = -5,6; E = 3,4 \text{ -----} \rightarrow \text{então } \beta = \frac{5,6}{3,4}$$

$$\beta = 1,64; \alpha = e^{5,6} = 270,43; \gamma = 0$$

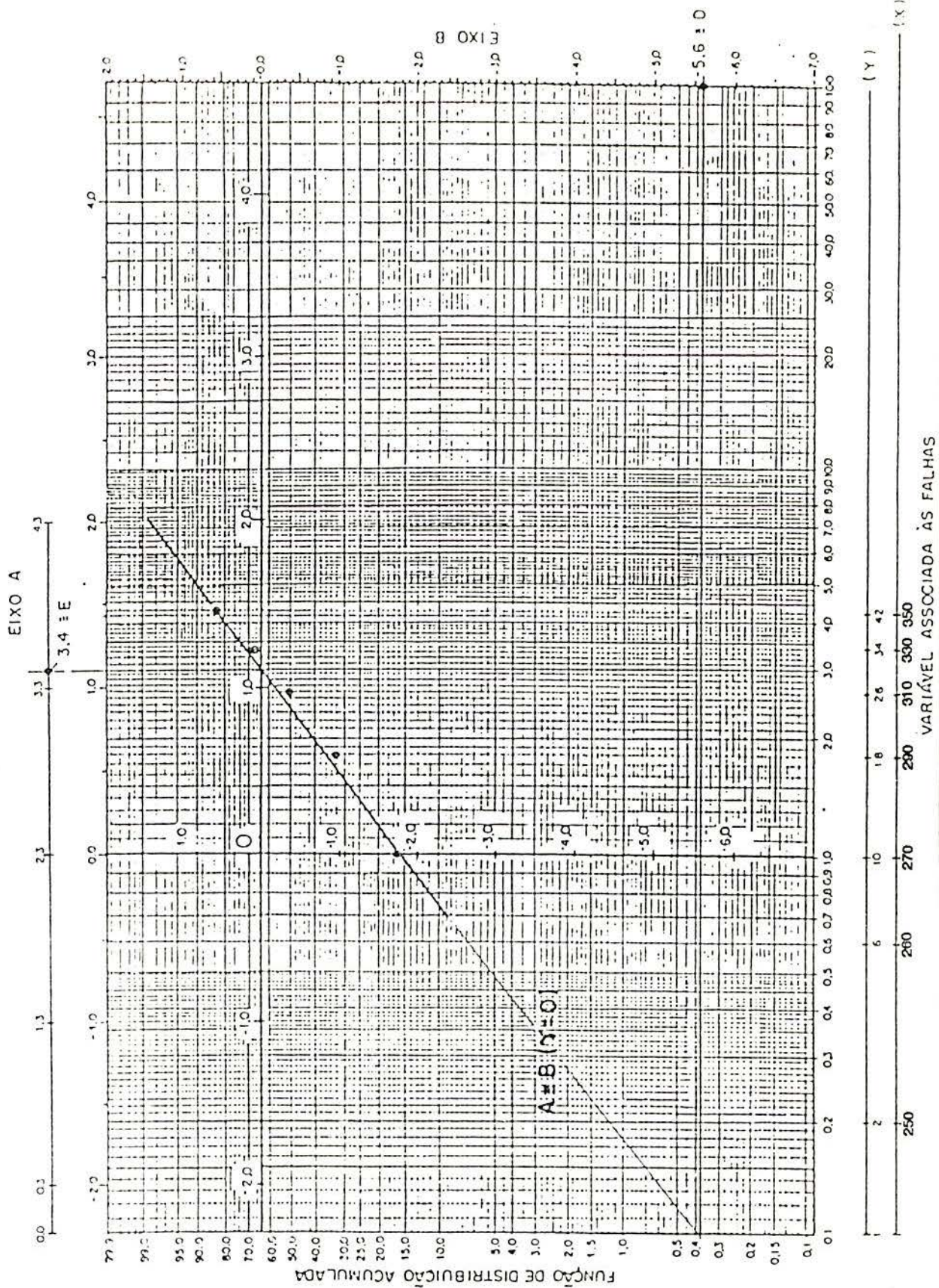


Figura 6.14 - Representação da função de distribuição acumulada $F(X)$ em função de X . Amostra com lote de cinco corpos de prova da "Al₂O₃ - Alumina Para Ferramenta de Corte".

Tabela 6.3 - Exemplo da apresentação dos dados agrupados segundo a função de distribuição acumulada. Os valores usados neste exemplo, tensão de ruptura, resultam do teste realizado na "Al₂O₃ - Alumina Para Ferramenta de Corte", obtidos através do ensaio de compressão diametral.

Intervalo de X AX= 20	X+ AX/2	Frequência percentual [i / (n+ 1)] n + 1 = 6	F(X) acumulada da amostra	(Y)	Fw(Xi) da distribuição de Weibull
250		0	0	2	0
	260	0			
270	278	1/6 = 0,16	0	10	0
	280				
290	280	1/6 = 0,16	0,16	18	0,15 (15%)
	300				
310	282	1/6 = 0,16	0,33	26	0,35 (35%)
	320				
330	288	1/6 = 0,16	0,50	34	0,54 (54%)
	340				
350	309	1/6 = 0,16	0,66	42	0,70 (70%)
	360	0	0,83		0,82 (82%)

Se esses valores forem levados à expressão da função de distribuição de Weibull (ver apêndice 1), obtém-se:

$$F_{\text{Weibull}}(Y) = F_w = 1 - e^{-\left(\frac{Y - \gamma}{270,42}\right)^\beta} = 1 - e^{-\left(\frac{Y}{270,42}\right)^{1,64}}$$

Transportando agora as variáveis, tem-se:

$$F_{\text{Weibull}}(X) = F_w(X) = 1 - e^{-\left(\frac{0,04 X - 86}{270,42}\right)^{1,64}}$$

Para a expressão anterior, substituindo-se os valores de X relativos a 270, 290, 310, 330, e 350 obtém-se os seguintes valores de $F_w(X)$:

$$F_w(270) = 0,15 \quad (15\%)$$

$$F_w(290) = 0,35 \quad (35\%)$$

$$F_w(310) = 0,54 \quad (54\%)$$

$$F_w(330) = 0,70 \quad (70\%)$$

$$F_w(350) = 0,82 \quad (82\%)$$

Estes valores estão indicados anteriormente na forma da coluna $F_w(X_i)$, vide tabela 6.3. Como se pode observar, as diferenças entre a probabilidade de ocorrer uma determinada resistência à ruptura por compressão diametral, considerando-se a amostragem tomada e aquelas esperadas estatisticamente pelo enquadramento das amostras à distribuição de Weibull, são bastante parecidas. Isto significa que uma amostra ensaiada com um lote de cinco corpos de prova pode ser modelada por este tipo de distribuição. Os resultados desse modelo, permite associar a resistência à ruptura por compressão diametral à probabilidade de que isto ocorra num dado nível de tensão, como mostra a figura 6.15 a seguir.

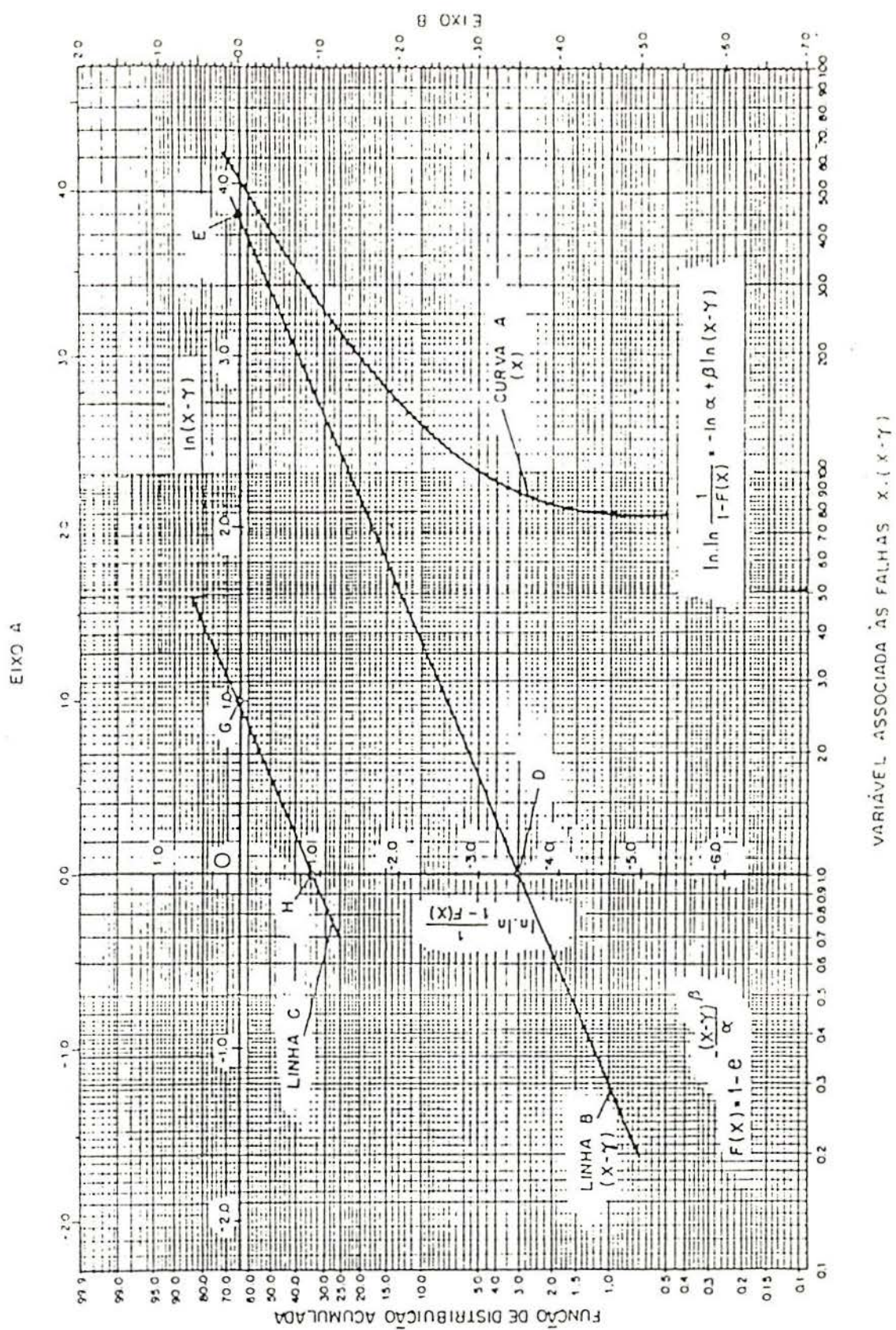


Figura 6.15 - Resistência à ruptura por compressão diametral em função da probabilidade associada, segundo a distribuição de Weibull, para a amostra "Al₂O₃ - Alumina Para Ferramenta de Corte".

6.6.1 METAL DURO (WC - Co)

A seguir apresenta-se os resultados dos ensaios de compressão diametral realizados nos corpos de prova das quatro **classes HF, NHA, HA e MPD2** de metal duro, totalizando dez lotes estudados neste trabalho. Cada classe deste material foi sempre ensaiado em lotes contendo, no mínimo, cinco corpos de prova. Quando a quantidade do material permitia os ensaios eram realizados com variações nas dimensões "D" e "L", diâmetro e espessura, respectivamente, conforme está mostrado nas tabelas 6.4 até a 6.13.

Tabela 6.4 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe HF**, com 3% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 9,5\text{mm}$ e espessura $L = 3,2\text{ mm}$. Pode-se observar também a **relação ($D/L = 2,9$)** e confrontá-la ao **ÍNDICE 16% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - HF com 3,00% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 9,5	
		L = 3,2	
Resistência a ruptura por Compressão Diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	300		60
2	342	18	63 > 60
3	349	11	
4	358	2	
5	392	32	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 360$		63 = soma dos desvios dos quatro melhores	+
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 348$		Incluir o pior corpo de prova.	+

Tabela 6.5 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe NHA**, com 5% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 12,7$ mm e espessura $L = 3,3$ mm. Pode-se observar também a **relação ($D/L = 3,8$)** e confrontá-la ao **ÍNDICE 1,9% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - NHA com 5,00% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 12,7	
		L = 3,3	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	401		10
2	404	7	29 > 10
3	407	4	
4	408	3	
5	426	15	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 411$		29 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 409$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.6 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe NHA**, com 5% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 12,7$ mm e espessura $L = 4,8$ mm. Pode-se observar também a **relação ($D/L = 2,6$)** e confrontá-la ao **ÍNDICE 6,9% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - NHA com 5,00% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 12,7	
		L= 4,8	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	389		33
2	409	13	51 > 33
3	410	12	
4	425	3	
5	445	23	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 422$		51 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 416$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.7 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe HA**, com 5,75% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 5,5$ mm e espessura $L = 2,9$ mm. Pode-se observar também a **relação** ($D/L = 1,9$) e confrontá-la ao **ÍNDICE 4,6% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - HA com 5,75% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 5,5	
		L= 2,9	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	539		31
2	555	15	45 > 31
3	563	7	
4	578	8	
5	585	15	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 570$		45 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 564$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.8 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe HA**, com 5,75% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 5,5$ mm e espessura $L = 3,5$ mm. Pode-se observar também a **relação** ($D/L = 1,6$) e confrontá-la ao **ÍNDICE 4,6% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - HA com 5,75% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 5,5	
		L= 3,5	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. Nº	V. Crescente		
1	470		28
2	478	20	61 > 28
3	487	11	
4	502	4	
5	524	26	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 498$		61 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 492$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.9 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe HA**, com 5,75% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $d = 9,5$ mm e espessura $L = 4,1$ mm. Pode-se observar também a relação ($D/L = 2,3$) e confrontá-la ao **ÍNDICE 1,9% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - HA com 5,75% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 9,5	
		L= 4,1	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	475		11
2	479	7	30 > 11
3	482	4	
4	482	4	
5	501	15	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 486$		30 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 484$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.10 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe HA**, com 5,75% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 9,5$ mm e espessura $L = 2,8$ mm. Pode-se observar também a relação ($D/L = 3,4$) e confrontá-la ao **ÍNDICE 1,8% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - HA com 5,75% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 9,5	
		L= 2,8	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	452		10
2	453	9	29 > 10
3	457	5	
4	466	4	
5	473	11	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 462$		29 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 460$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.11 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe HA**, com 5,75% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 13,1$ mm e espessura $L = 3,1$ mm. Pode-se observar também a relação ($D/L = 4,2$) e confrontá-la ao **ÍNDICE 4,5% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - HA com 5,75% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D = 13,1	
		L = 3,1	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	337		19
2	347	9	33 > 19
3	349	7	
4	360	4	
5	369	13	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 356$		33 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 352$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.12 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe HA**, com 5,75% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 13,2$ mm e espessura $L = 4,0$ mm. Pode-se observar também a relação ($D/L = 3,3$) e confrontá-la ao **ÍNDICE 9% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - HA com 5,75% de Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 13,2	
		L= 4,0	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	300		33
2	304	29	127 > 33
3	309	24	
4	323	10	
5	397	64	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 333$		127 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 327$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.13 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do metal duro, **classe MPD2**, com 12,25% de Cobalto e suas respectivas dimensões, diâmetro $D = 9,5$ mm e espessura $L = 3,2$ mm. Pode-se observar também a relação ($D/L = 3,0$) e confrontá-la ao **ÍNDICE 4,6% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: WC - MPD2 com 12,25% Co		Origem: BRASSINTER	
Dimensões (mm)		D= 9,5	
		L= 3,2	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	480		28
2	493	15	49 > 28
3	498	10	
4	511	3	
5	529	21	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 508$		49 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 502$		Incluir o pior corpo de prova.	

6.6.2 Si₃N₄ - NITRETO DE SILÍCIO

Seguem-se os resultados dos Ensaio de Compressão Diametral realizados em corpos de prova de "Si₃N₄ - Nitreto de Silício", estudados neste trabalho. A quantidade deste material disponível permitiu que fossem testados dois lotes de cinco amostras cada, com variações nas dimensões "D" e "L", diâmetro e espessura, respectivamente, conforme está mostrado nas tabelas 6.14 e 6.15.

Tabela 6.14 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do "**Si₃N₄ - Nitreto de Silício**", com as respectivos dimensões diâmetro D = 5,0 mm e espessura L = 2,2 mm. Pode-se observar também a relação (D/L = 2,3) e confrontá-la ao **ÍNDICE 9% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: " Si₃N₄ - Nitreto de Silício "		Origem: KENNAMETAL	
Dimensões (mm)		D= 5,0	
		L= 2,2	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	289		33
2	294	28	94 > 33
3	303	19	
4	324	2	
5	367	45	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 322$		94 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 315$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.15 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras do "**Si₃N₄** - Nitreto de Silício", com as respectivas dimensões diâmetro $D = 5,0$ mm e espessura $L = 3,0$ mm. Pode-se observar também a relação ($D/L = 1,7$) e confrontá-la ao **ÍNDICE 10% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: " Si₃N₄ - Nitreto de Silício"		Origem: KENNAMETAL	
Dimensões (mm)		D= 5,0	
		L= 3,0	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. Nº	V. Crescente		
1	307		38
2	318	27	87 > 38
3	329	16	
4	358	13	
5	376	31	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 345$		87 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 338$		Incluir o pior corpo de prova.	

6.6.3 ALUMINA COM CARBETO DE TUNGSTÊNIO (Al_2O_3 - WC)

Seguem-se os resultados dos Ensaio de Compressão Diametral realizados nos corpos de prova da (Al_2O_3 - WC) Alumina com carbeto de tungstênio, e utilizada na fabricação para ferramentas de corte" também, estudada neste trabalho. A quantidade disponível deste material permitiu que fosse testado somente um lote de cinco amostras conforme mostrado na tabela 6.16.

Tabela 6.16 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras da "**Al₂O₃ - Alumina Para Ferramenta de Corte**", com as respectivas dimensões diâmetro D = 5,3 mm e espessura L = 1,4 mm. Pode-se observar também a relação (D/L = 3,8) e confrontá-la ao **ÍNDICE 3,2% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: " Al₂O₃ - Alumina Para Ferramenta de Corte "		Origem: REVOLOX	
Dimensões (mm)		D= 5,3	
		L= 1,4	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	278		12
2	280	10	39 > 12
3	282	8	
4	288	2	
5	309	19	
Média com quatro melhores resultados (x4) = 290		39 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados (x5) = 287		Incluir o pior corpo de prova.	

6.6.4 CERÂMICA DE ALTA ALUMINA (90% - Al₂O₃)

A seguir são apresentados os resultados dos Ensaio de Compressão Diametal realizados em corpos de prova da "Al₂O₃ - Alumina para Indústria Química", também estudada neste trabalho. A quantidade disponível deste material permitiu que fossem testados três lotes de cinco amostras cada, com variações nas dimensões dos corpos de prova "D" e "L", diâmetro e espessura respectivamente conforme está mostrado nas tabelas 6.17; 6.18 e 6.19.

Tabela 6.17 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras da "**Al₂O₃ - Alumina Para Indústria Química**", com as respectivas dimensões, diâmetro D = 22,5 mm e espessura L = 6,2 mm. Pode-se observar também a relação (D/L = 3,6) e confrontá-la ao **ÍNDICE 9,6% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: " Al₂O₃ - Alumina Para Indústria Química "		Origem: NGK	
Dimensões (mm)		D= 22,5	
		L= 6,2	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	52		7
2	54	5	12 > 7
3	57	2	
4	60	1	
5	63	4	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 59$		12 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 57$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.18 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras da "Al₂O₃ - Alumina Para Indústria Química", com as respectivas dimensões, diâmetro D = 6,0 mm e espessura L = 3,0 mm. Pode-se observar também a relação (D/L = 2,0) e confrontá-la ao ÍNDICE 7,9% DO DESVIO, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe: "Al ₂ O ₃ - Alumina Para Indústria Química"		Origem: NGK	
Dimensões (mm)		D= 6,0	
		L= 3,0	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvio com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	76		7
2	80	3	12 > 7
3	80	3	
4	83	0 (zero)	
5	89	6	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 88$		12 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 82$		Incluir o pior corpo de prova.	

Tabela 6.19 - Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral realizados em lote de cinco amostras da "**Al₂O₃ - Alumina Para Indústria Química**", com as respectivas dimensões diâmetro D = 6,0 mm e espessura L = 2,0 mm. Pode-se observar também a relação (D/L = 3,0) e confrontá-la ao **ÍNDICE 10% DO DESVIO**, entre a resistência medida do pior corpo de prova contra a média usando todos os resultados.

Classe:"Al ₂ O ₃ - Alumina Para Indústria Química"		Origem: NGK	
Dimensões (mm)		D= 6,0	
		L= 2,0	
Resistência a ruptura por compressão diametral (MPa)		Desvios com relação a média \bar{x}_4 (MÓDULO).	
C.P. N°	V. Crescente		
1	89		12
2	91	10	24 > 12
3	98	3	
4	106	5	
5	107	6	
Média com quatro melhores resultados $\bar{x}_4 = 101$		24 = soma dos desvios dos quatro melhores	
Média usando todos resultados $\bar{x}_5 = 98$		Incluir o pior corpo de prova.	

6.7 Preparação dos Modelos para ANÁLISE DE TENSÕES NOS MÉTODOS: Flexão a Três Pontos e Compressão Diametral

Conforme descrito no item 5.4 do capítulo anterior, foi simulado a partir dos resultados obtidos nos ensaios de flexão a três pontos, lote 6.1 e compressão diametral, lotes 6.17 e 6.18, uma análise via elementos finitos em um dos materiais cerâmicos estudados e classificado como " Al_2O_3 - Alumina para a Indústria Química". Tivemos como propósito a obtenção de uma melhor visualização na distribuição das tensões resultante do carregamento durante a realização dos referidos ensaios. Assim, neste estudo, foi utilizado o **módulo de análise linear de tensões** do software "ALGOR Inc." pois, este critério contempla a necessidade de uma visualização qualitativa na distribuição das tensões nos corpos de prova durante os ensaios realizados de **Flexão a Três Pontos e Compressão Diametral**.

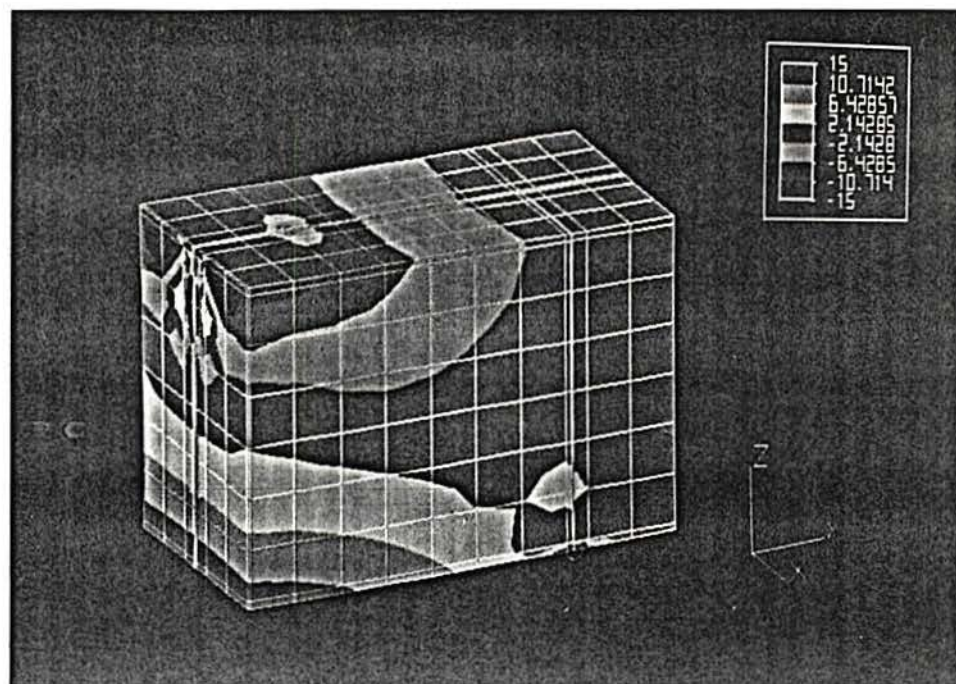
6.7.1 FLEXÃO A TRÊS PONTOS - Preparação do Modelo

De posse do desenho e com as informações necessárias como dimensões do corpo de prova, distâncias entre apoios e local de aplicação da carga é feita a modelagem. Saliencia-se que não foram estabelecidas restrições em relação aos possíveis deslocamentos nas posições dos dois cilindros de apoio, ambos pertencentes ao dispositivo utilizado para realizar o ensaio de flexão a três

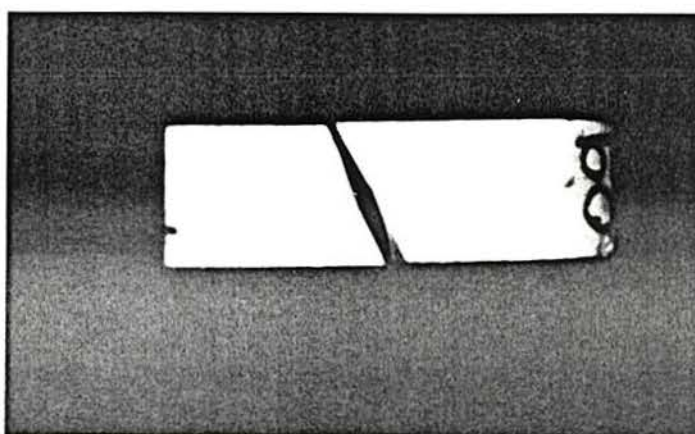
pontos, nem na superfície de contato no centro do corpo de prova onde ocorre o carregamento através de uma esfera. A carga foi aplicada no centro geométrico do corpo de prova através de uma esfera de carbeto de tungstênio com raio igual a 5 mm. Este, bi-apoiado em dois cilindros equidistantes, foi carregado até sua ruptura que ocorreu com uma carga de 119 N. Assim, do lote referente a tabela 6.1, foi escolhido somente um entre os nove corpos de prova ensaiados em flexão a três pontos, com as seguintes dimensões: base $b=4,97$ mm e altura $h=6,30$ mm. Adicionalmente foram utilizadas as características dos materiais para o cálculo das áreas efetivas em contato: **esfera/corpo de prova** e **corpo de prova/cilindros de apoio**, utilizando a equação [4.5], modelo de Hertz. Desta forma foram obtidas as seguintes áreas de contato:

- **Esfera/Corpo de Prova** - **ÁREA = $0,01 \text{ mm}^2$**
- **Corpo de Prova/Cilindros de Apoio** - **ÁREA = $0,14 \text{ mm}^2$**

Temos, então, dois tipos de tensões resultantes no ensaio de flexão a três pontos; as tensões de contato, ou tensões de Hertz, e as tensões de flexão ao longo de todo o corpo de prova resultante da condição de carregamento. Nos conjuntos das figuras 6.15 e 6.16 apresentamos, respectivamente, os resultados da análise linear via elementos finitos realizada de uma forma qualitativa: primeiro no plano da face e segundo no seu plano central, ambos localizados de forma longitudinal ao corpo de prova ensaiado. Ainda, neste ensaio de Flexão a Três Pontos, apresentamos somente a metade do modelo de cálculo simulado por tratar-se de uma geometria simétrica.



(a)



(b)

Figura 6.15 - (a)- Distribuição das tensões **no plano da face** de um corpo de prova submetido ao ensaio de flexão em três pontos segundo análise linear via elementos finitos "ALGOR Inc.". (b)- Foto de um corpo de prova de dimensões: base $b=4,97$ mm e altura $h=6,30$ mm, rompido no ensaio de flexão em três pontos com o aspecto da fratura semelhante a inclinação da curva de tensões vide figura 6.15(c).

TENSÃO	EIXO Z(mm)
-12,29	6,30
-9,75	6,15
-6,85	5,15
-0,18	4,15
2,18	3,15
4,35	2,15
7,68	1,15
12,72	0,15
13,01	0,00

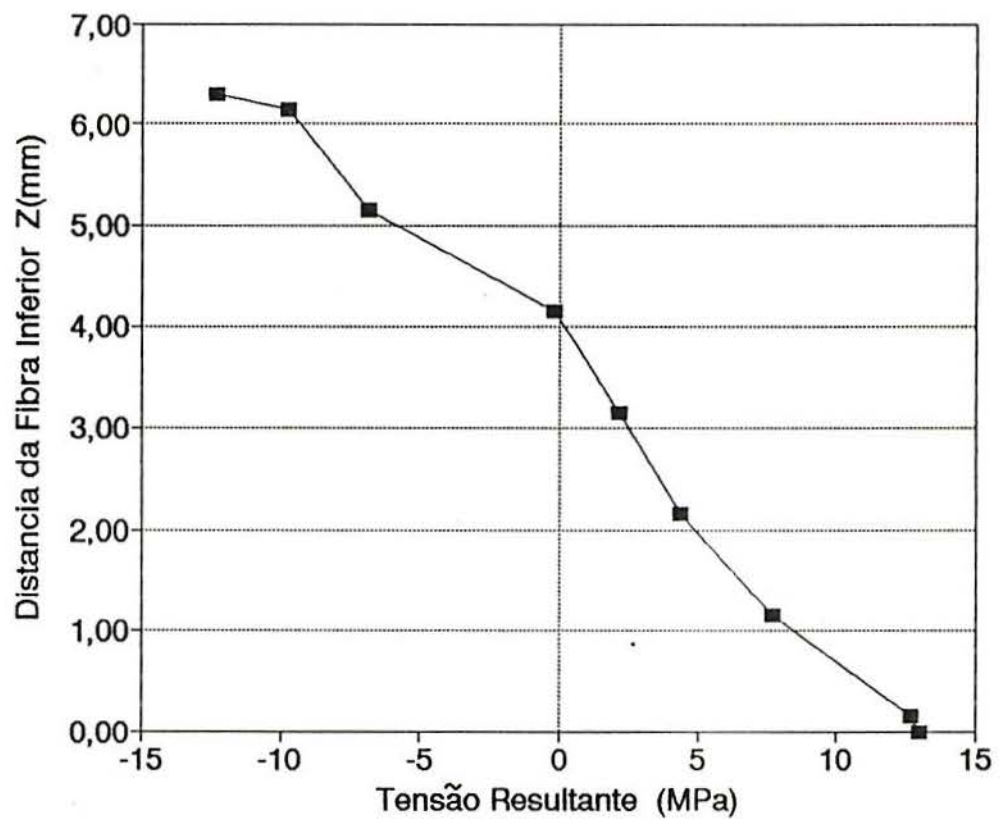


Figura 6.15 - (c)- Pontos calculados via elementos finitos, mostrando o perfil de distribuição das tensões trativas e compressivas **no plano da face** do mesmo corpo de prova. Quadro anexo com registros dos pontos de tensão/posição localizados ao longo do eixo Z(mm).

TENSÃO	EIXO Z(mm)
-1.582,17	6,30
-476,54	6,15
-25,34	5,15
0,72	4,15
0,33	3,15
4,96	2,15
7,16	1,15
18,20	0,15
16,50	0,00

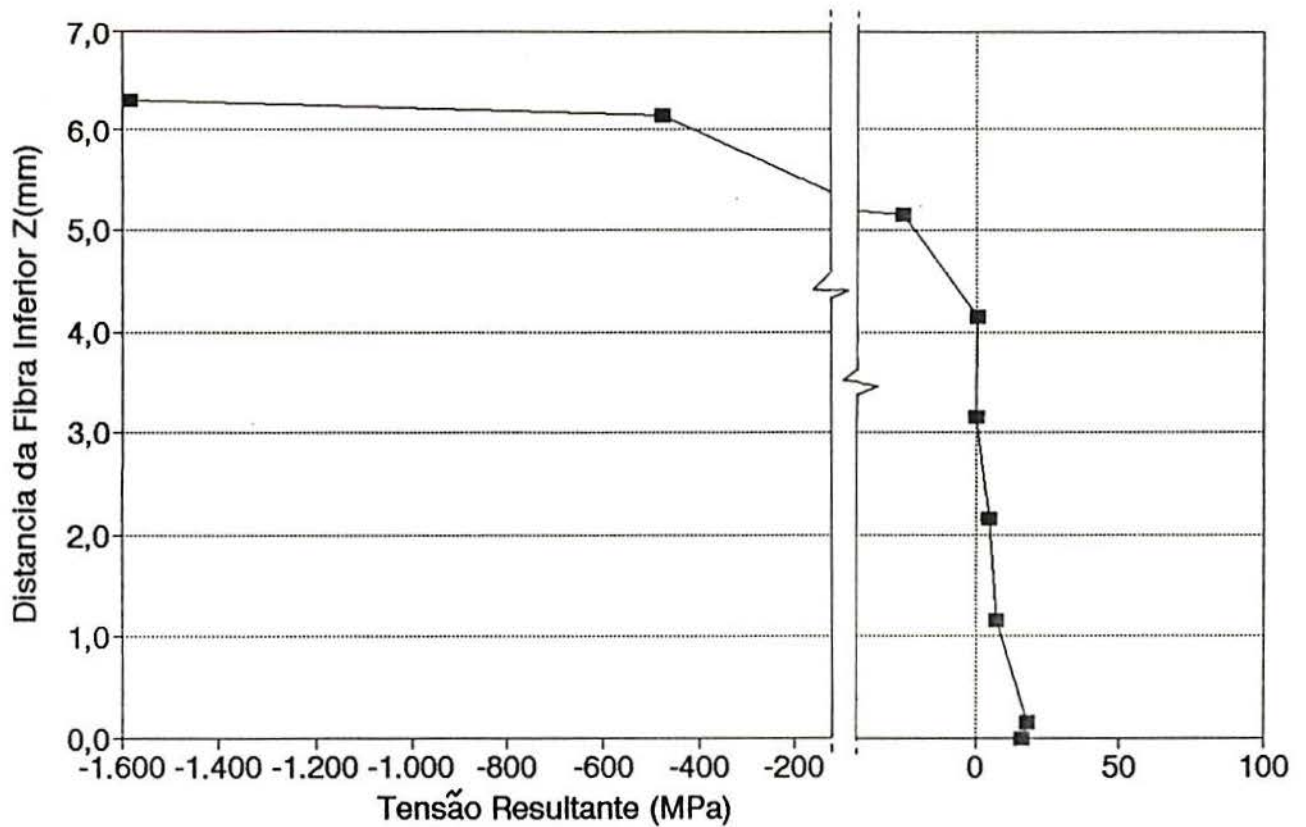


Figura 6.16 - (a)- Curva calculada via elementos finitos, apresentando o perfil de distribuição das tensões trativas e compressivas **no plano "yz" do centro longitudinal** do mesmo corpo de prova. Quadro anexo com registros dos pontos de tensão/posição localizados ao longo do eixo Z(mm).

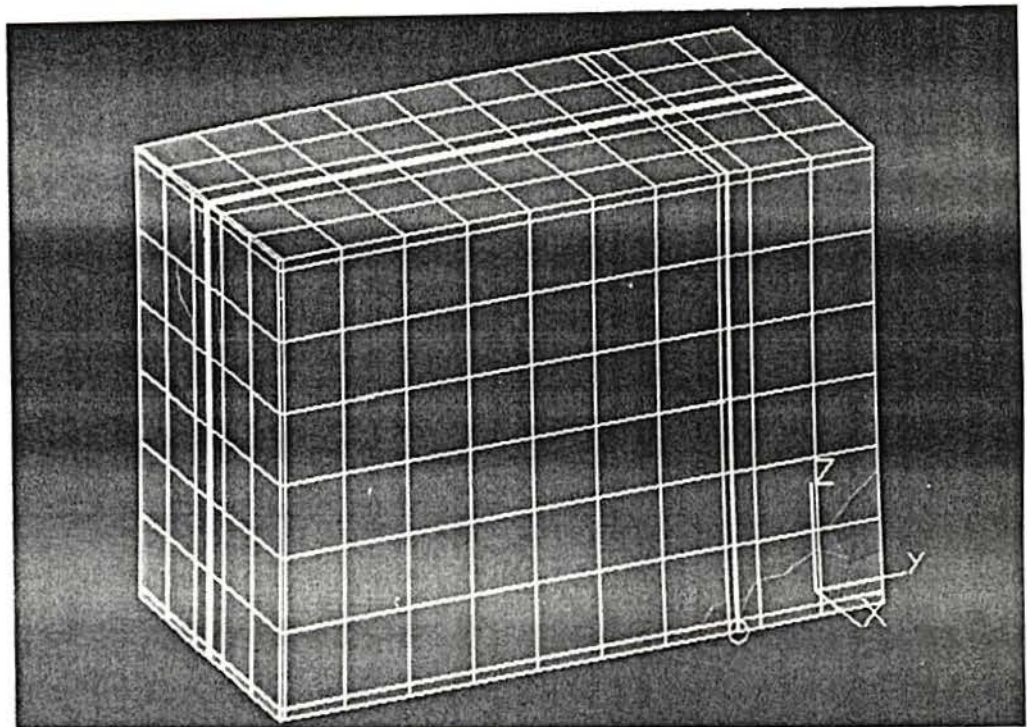


Figura 6.16 - **(b)**- Distribuição das tensões trativas (região azul) e compressivas (região magenta) no plano transversal "xz" de um corpo de prova submetido ao ensaio de flexão em três pontos, segundo análise linear via elementos finitos "ALGOR Inc.". Podemos observar que há uma predominância do tipo: tensão trativa de 60% contra tensão compressiva de 40% em relação a área total solicitada.

6.7.2 COMPRESSÃO DIAMETRAL - Preparação dos modelos

Com os resultados dos Ensalos de Compressão Diametral foram realizados análises via elementos finitos em dois corpos de prova sendo um de cada lote, ambos do mesmo material mas com dimensões diferentes.

Aliado a isso e para ajudar na compreensão referente a forma geométrica da ruptura ocasionada pelo ensaio de Compressão Diametral ou "TESTE BRASILEIRO", apresenta-se nas figuras 6.17(b) e 6.19(b) uma foto de cada corpo de prova ensaiado por este método.

a) Do lote referente a tabela 6.17, foi escolhido um entre os cinco corpos de prova ensaiados com as seguintes dimensões: diâmetro $D=22,5$ mm e espessura $L=6,2$ mm. Após devidamente desenhado pelo software e com o local de aplicação da carga definido realiza-se o modelamento. Na região inferior do corpo de prova, este de geometria cilíndrica e, portanto, formando com a base plana do dispositivo tipo Bigorna de Bridgman uma linha de contato, foi estabelecida uma vinculação em um dos nós.

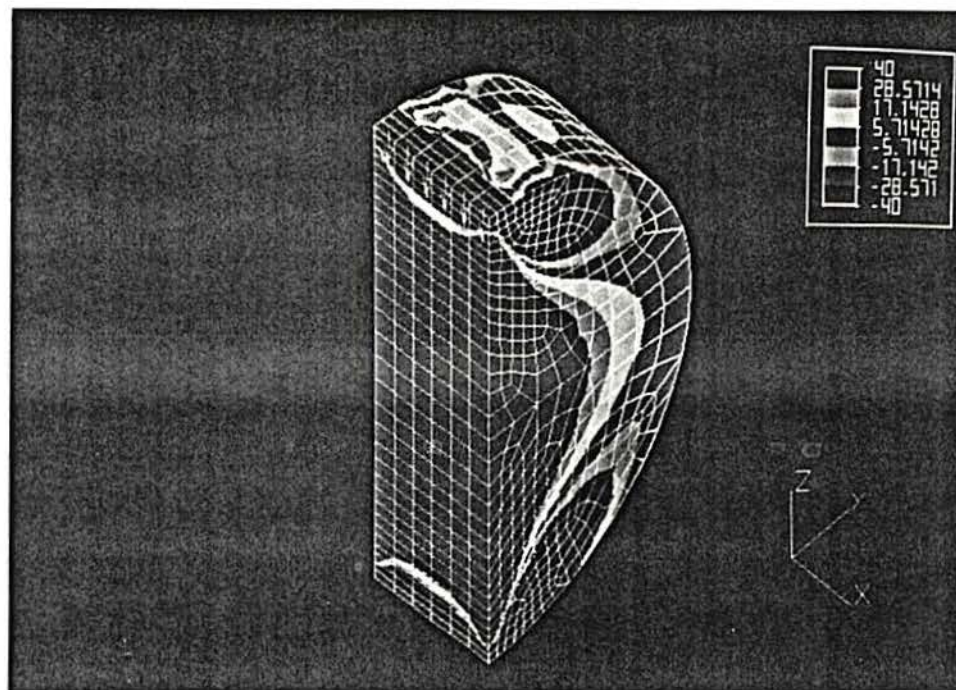
A carga foi aplicada na região diametralmente oposta através do punção superior do dispositivo até a ruptura do corpo de prova que ocorreu com 14 kN. Assim, com os dados experimentais e as dimensões referentes ao corpo de prova bem como as características dos materiais em questão, foram calculadas as áreas em contato **corpo de prova/punção plano**, utilizando a equação [4.5], obtendo-se as seguintes áreas de contato:

- **Corpo de Prova/Punção plano** - **ÁREA = 4,41 mm²**

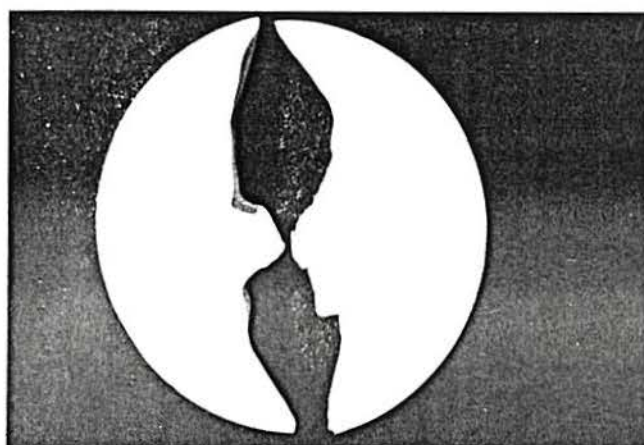
Desta forma temos dois tipos de tensões resultantes no ensaio de compressão diametral; as tensões de contato ou tensões de Hertz e as tensões resultantes da condição de carregamento diametral.

Nos conjuntos das figuras 6.17 e 6.18 apresentamos o resultado da análise linear via elementos finitos, realizada de uma forma qualitativa, da distribuição destas tensões localizadas na face do corpo de prova ensaiado e ao longo do seu centro longitudinal.

Ainda, apresenta-se na figura 6.17(b), uma foto de um corpo de prova rompido no ensaio de compressão diametral com o aspecto da fratura em forma de dupla meia lua.



(a)



(b)

Figura 6.17 - (a)- Distribuição das tensões **no plano da face** de um corpo de prova submetido ao ensaio de compressão diametral segundo análise linear via elementos finitos "ALGOR Inc.". (b)- Foto de um corpo de prova de dimensões: diâmetro $D=22,5$ mm e espessura $L=6,2$ mm, rompido no ensaio de compressão diametral com o aspecto da fratura em forma de dupla meia lua.

TENSÃO	EIXO Z(mm)
37,89	0,00
38,67	1,20
38,90	2,39
39,41	3,39
39,87	4,38
40,54	5,21
41,67	6,04
43,06	6,74

45,27	7,43
47,79	8,01
51,85	8,59
55,91	9,07
58,07	9,55
56,24	9,97
40,12	10,38
-47,42	10,82
-1.043,13	11,25

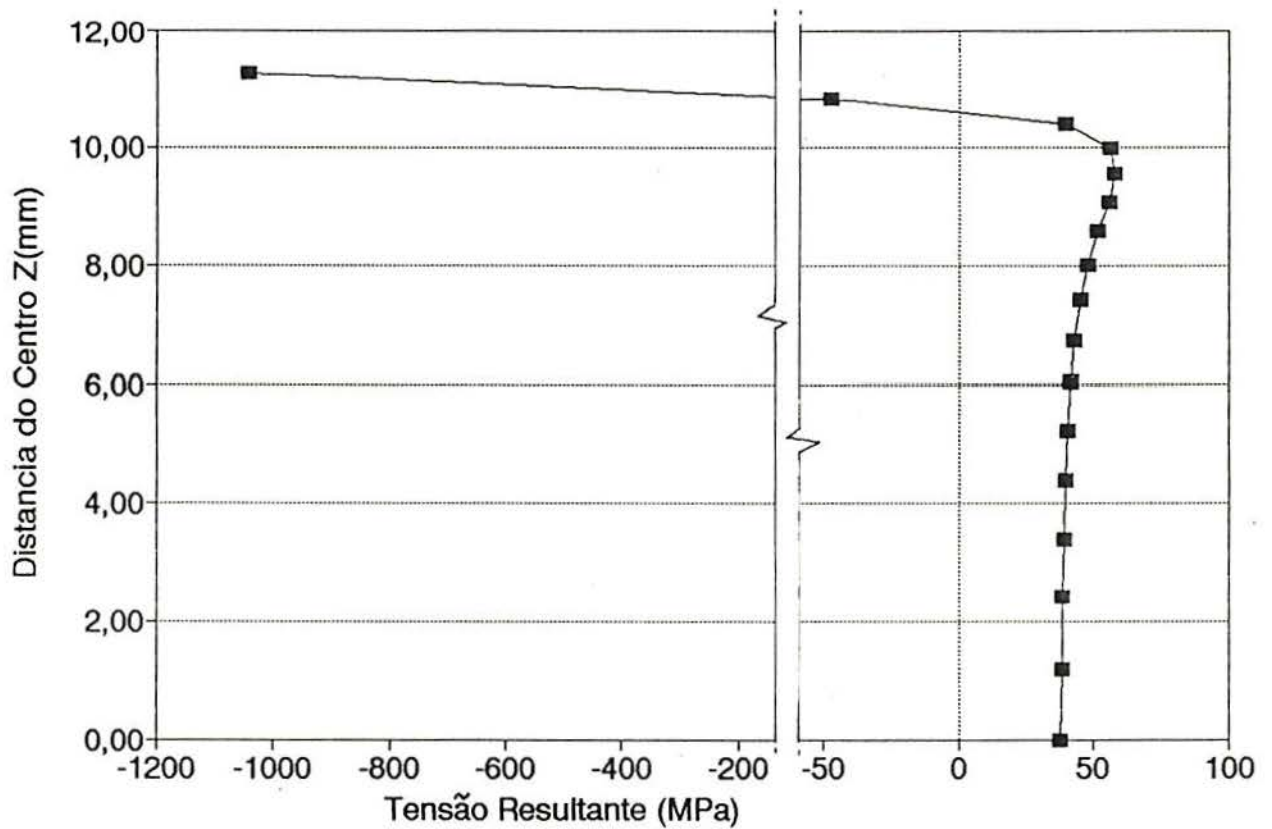


Figura 6.17 - (c)- Curva calculada via elementos finitos, mostrando o perfil de distribuição das tensões trativas e compressivas **no plano da face** do mesmo corpo de prova. Quadro anexo com registros dos pontos de tensão/posição localizados ao longo do eixo Z(mm).

TENSÃO	EIXO Z(mm)
35,74	0,00
36,33	1,20
36,17	2,39
36,00	3,39
35,45	4,38
34,60	5,21
33,52	6,04
31,80	6,74

29,64	7,43
26,25	8,01
22,11	8,59
15,10	9,07
2,20	9,55
-19,20	9,97
-60,99	10,38
-182,34	10,82
-1.155,87	11,25

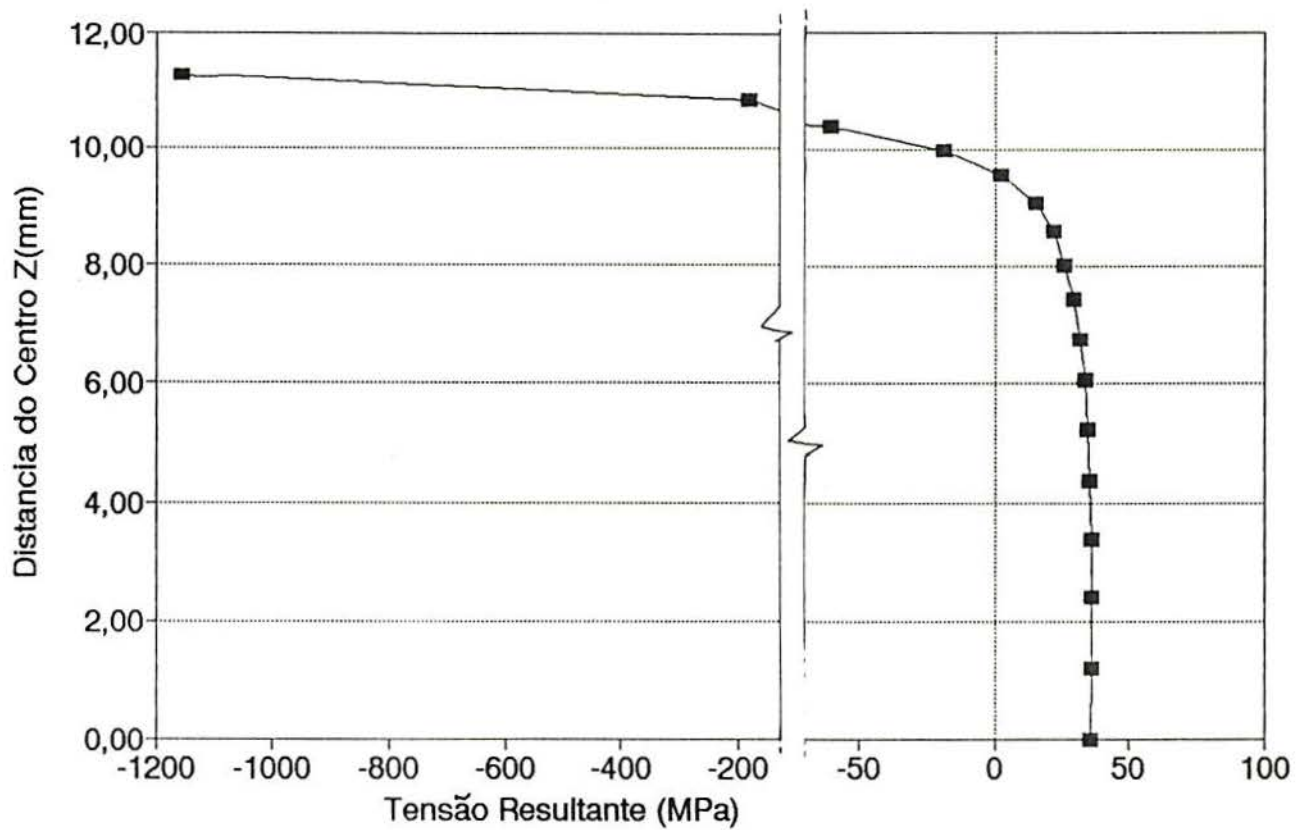


Figura 6.18 - (a)- Curva calculada via elementos finitos, mostrando o perfil de distribuição das tensões trativas e compressivas no plano "yz" do centro longitudinal do mesmo corpo de prova. Quadro anexo com registros dos pontos de tensão/posição localizados ao longo do eixo Z(mm).

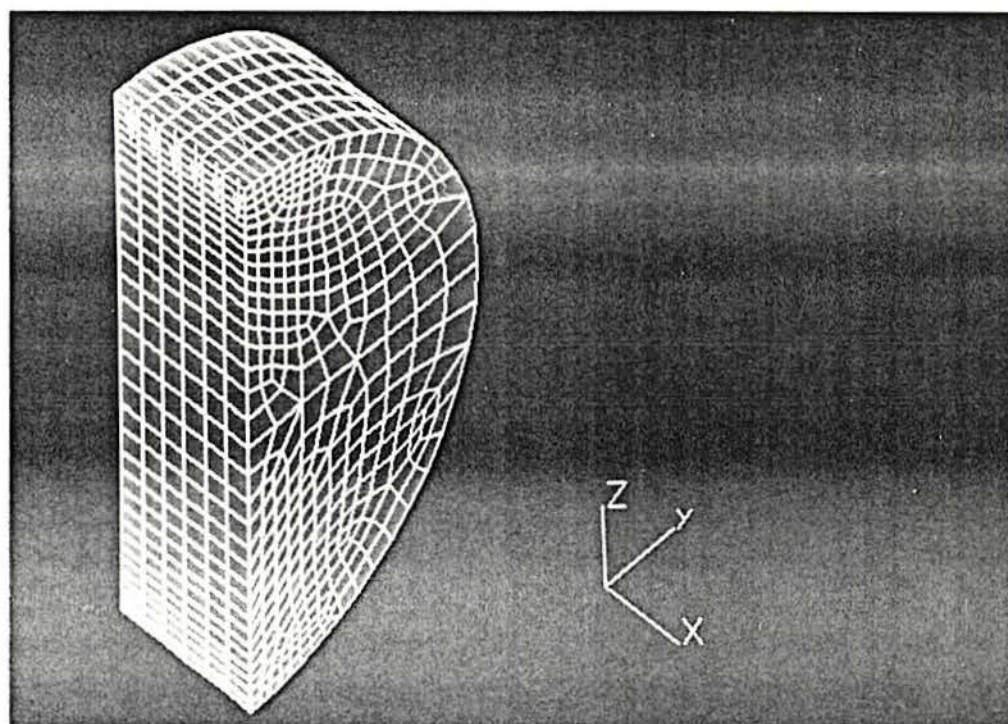


Figura 6.18 - (b)- Distribuição das tensões trativas (região azul) e compressivas (região magenta) no plano transversal "xz" de um corpo de prova, lote 6.17, submetido ao ensaio de compressão diametral, segundo análise linear via elementos finitos "ALGOR Inc.". Pode-se observar que há uma predominância do tipo: tensão trativa contra tensão compressiva em relação a área total solicitada.

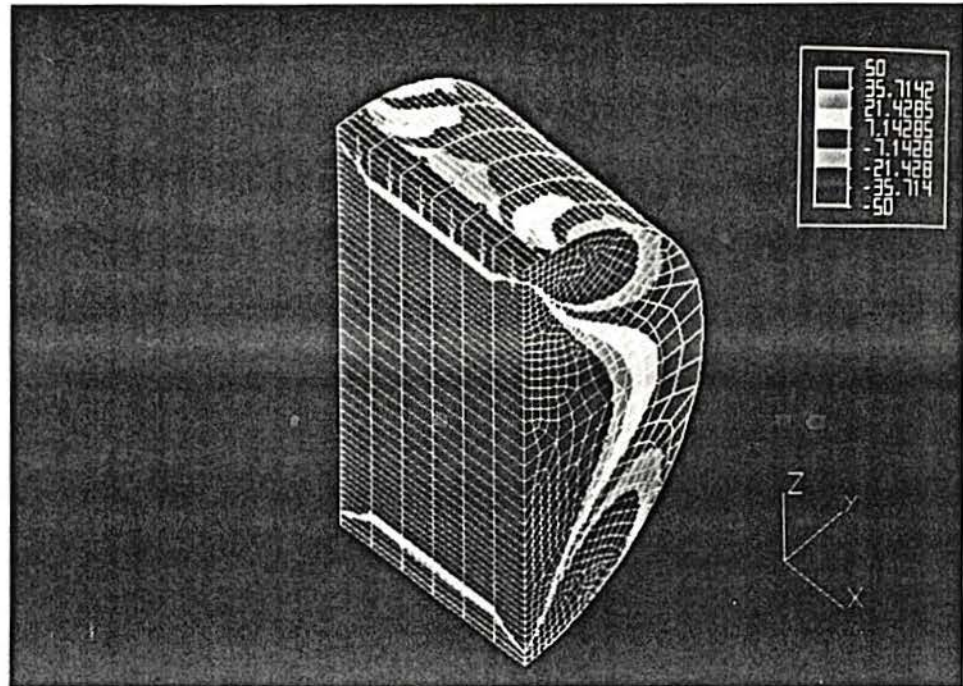
b) Do lote referente a tabela 6.18 também, foi escolhido um corpo de prova com as seguintes dimensões: diâmetro $D = 6,0$ mm e espessura $L = 3,0$ mm. Após devidamente desenhado pelo CAD do software e definido o local de aplicação da carga, realizou-se o modelamento. Salienta-se que na região inferior do corpo de prova, este de geometria cilíndrica e portanto formando com a base plana do dispositivo tipo Bigorna de Bridgman uma linha de contato, foi estabelecida uma vinculação em um dos nós. A carga foi aplicada na região diametralmente oposta através do punção superior do dispositivo até a ruptura do corpo de prova que ocorreu com 2 250 N.

Assim, com os dados experimentais e as dimensões referentes ao corpo de prova bem como as características dos materiais em questão foram calculadas as áreas de contato; **corpo de prova/punção plano**. O emprego da equação [4.5] leva a seguinte área de contato:

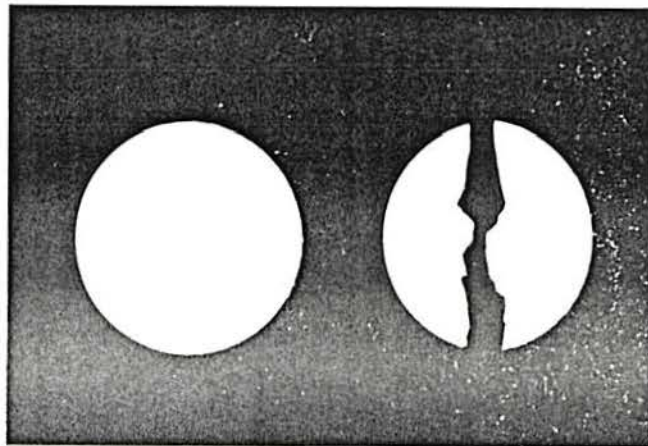
$$\text{- Corpo de Prova/Punção plano - } \mathbf{ÁREA = 0,68 \text{ mm}^2}$$

Desta forma temos dois tipos de tensões resultantes no ensaio de compressão diametral; as tensões de contato ou tensões de Hertz e as tensões resultantes da condição de carregamento diametral.

Nos conjuntos das figuras 6.19 e 6.20 apresentam-se os resultados da análise linear via elementos finitos realizada de uma forma qualitativa como ocorrem a distribuição destas tensões localizadas na face do corpo de prova ensaiado e ao longo do seu centro longitudinal. Apresenta-se, ainda na figura 6.19(b), uma foto de um corpo de prova rompido no ensaio de compressão diametral com o aspecto da fratura em forma de dupla meia lua.



(a)



(b)

Figura 6.19 - (a)- Distribuição das tensões no plano da face de um corpo de prova submetido ao ensaio de compressão diametral segundo análise linear via elementos finitos "ALGOR Inc.". (b)- Foto de um corpo de prova de dimensões: diâmetro $D=6,0$ mm e espessura $L=3,0$ mm, rompido no ensaio de compressão diametral com aspecto da fratura em forma de dupla meia lua.

TENSÃO	EIXO Z(mm)
49,03	0,00
49,67	0,24
50,14	0,49
50,86	0,69
51,64	0,90
52,59	1,06
53,86	1,23
55,23	1,38
57,00	1,52
58,84	1,63
61,32	1,75

63,73	1,86
66,47	1,96
70,30	2,06
74,73	2,17
79,19	2,27
83,43	2,38
86,50	2,48
85,69	2,58
73,64	2,69
23,22	2,79
-128,59	2,90
-1.345,85	3,00

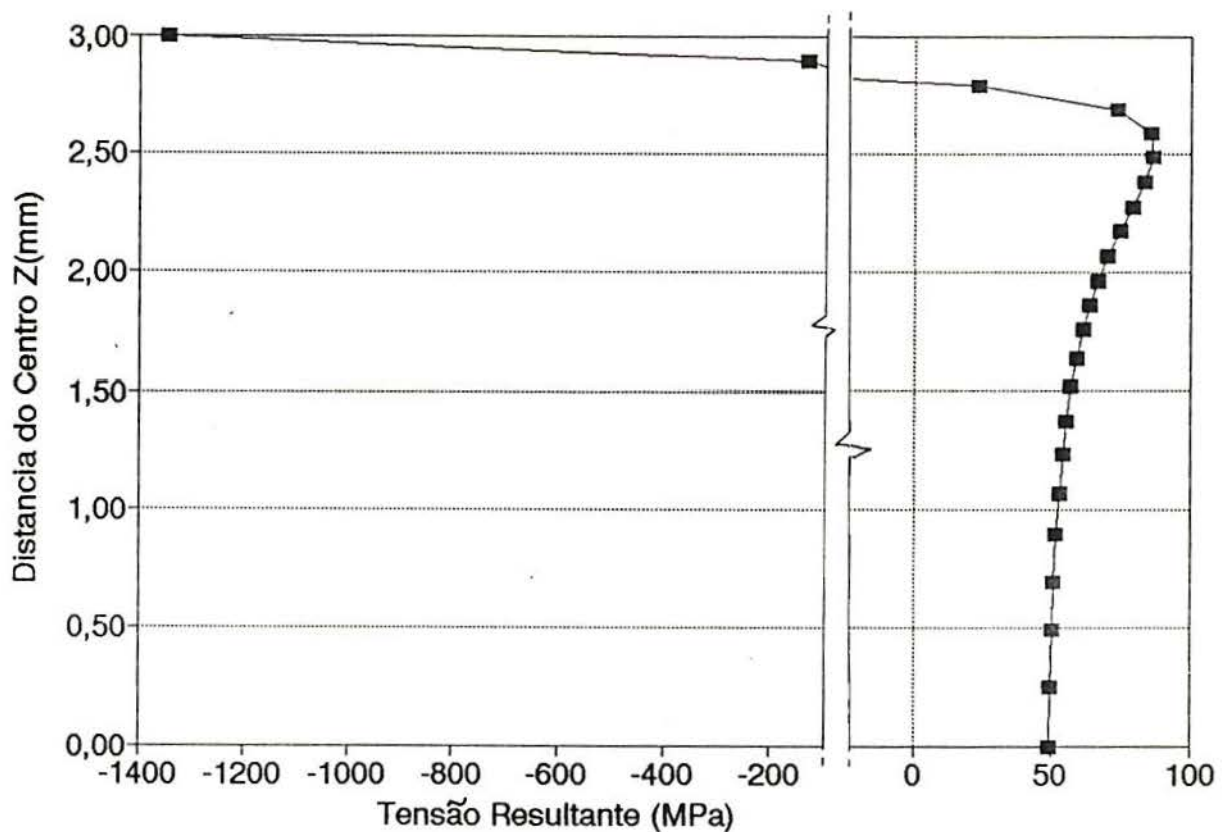


Figura 6.19 - (c)- Curva calculada via elementos finitos, mostrando o perfil de distribuição das tensões trativas e compressivas **no plano da face** do mesmo corpo de prova. Quadro anexo com registros dos pontos de tensão/posição localizados ao longo do eixo Z(mm).

TENSÃO	EIXO Z(mm)
40,76	0,00
41,13	0,24
40,98	0,49
40,81	0,69
40,37	0,90
39,79	1,06
39,17	1,23
38,40	1,38
37,68	1,52
36,77	1,63
36,02	1,75

34,66	1,86
32,99	1,96
31,57	2,06
30,05	2,17
27,82	2,27
24,32	2,38
18,30	2,48
6,71	2,58
-18,09	2,69
-83,13	2,79
-248,38	2,90
-1.424,17	3,00

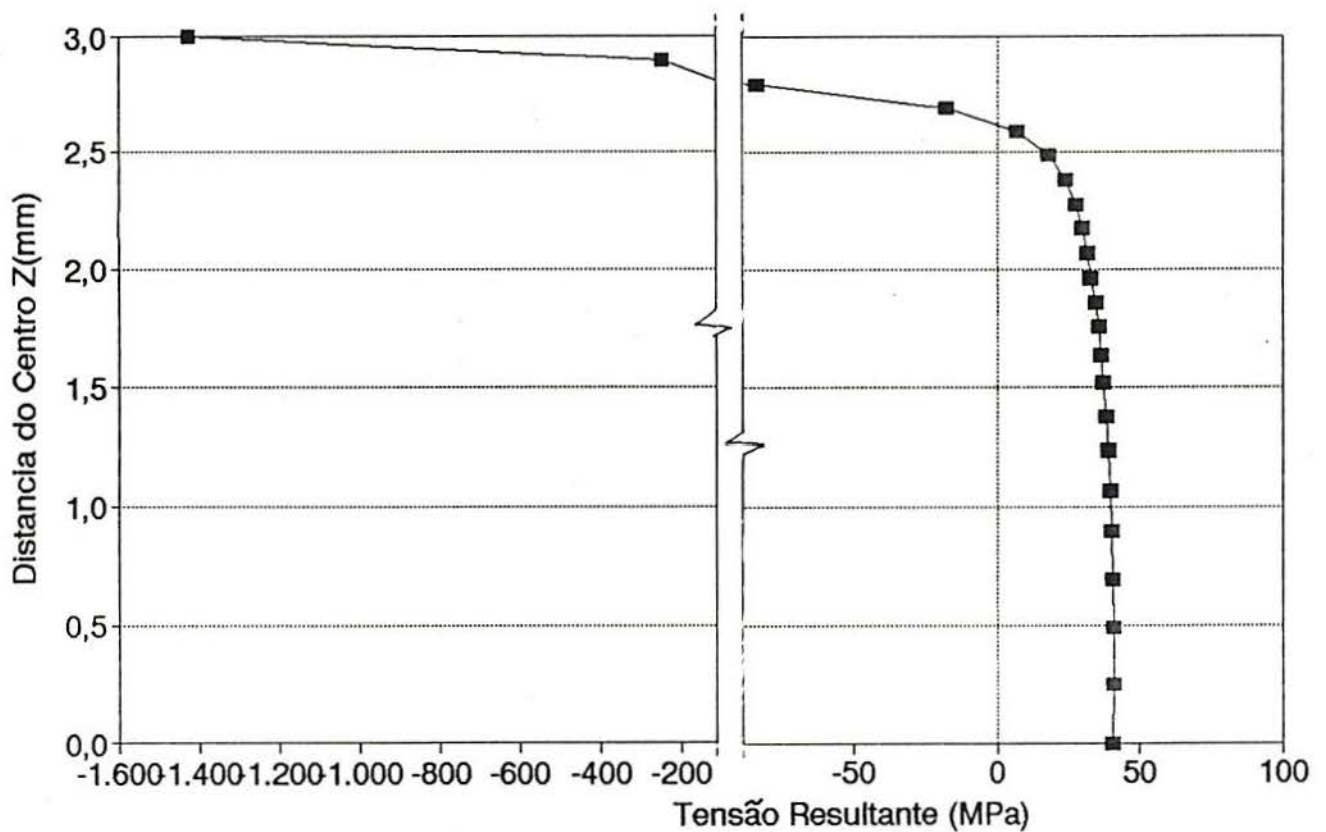


Figura 6.20 - (a)- Curva calculada via elementos finitos, mostrando o perfil de distribuição das tensões trativas e compressivas no plano "yz" do centro longitudinal do mesmo corpo de prova. Quadro anexo com registros dos pontos de tensão/posição localizados ao longo do eixo Z(mm).

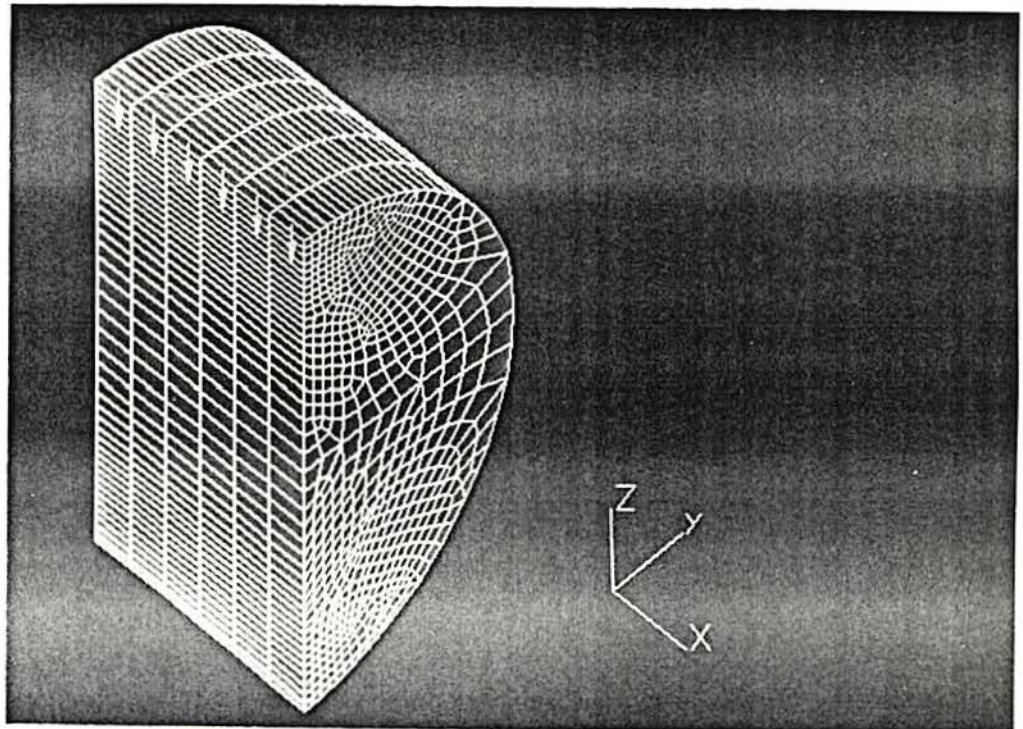


Figura 6.20 - (b)- Distribuição das tensões trativas (região azul) e compressivas (região magenta) **no plano transversal "xz"** de um corpo de prova, lote 6.18, submetido ao ensaio de compressão diametral, segundo análise linear via elementos finitos "ALGOR Inc.". Pode-se observar que há uma predominância do tipo: tensão trativa contra tensão compressiva em relação a área total solicitada.

CAPÍTULO 7

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 INTRODUÇÃO

Os dados a seguir serão discutidos separadamente, conforme apresentado no capítulo 6, através dos respectivos lotes de materiais cerâmicos confeccionados e testados. Quanto às medidas, os valores de força apresentam um erro na faixa de 1% inerente da máquina universal de ensaios utilizada neste estudo. Entretanto, a flutuação observada para as medidas de dureza está em torno de 3%. Já nas medidas de resistência obtidas via Ensaio de Compressão Diametral ou "TESTE BRASILEIRO", as flutuações são maiores. Nos dezessete lotes testados os desvios atingiram índices que variam de 1,8 até 16%,

dependendo da relação estabelecida entre o diâmetro e a espessura (D/L) adotada para os corpos de prova e, também, do tipo de cerâmica com suas composições químicas apresentadas em tabelas no capítulo 3.

Na figura 7.1 a seguir, apresenta-se os valores da média de resistência a compressão diametral das respectivas cerâmicas: Al_2O_3 -90%, Al_2O_3 -WC, Si_3N_4 , e das quatro classes do metal duro HF, NHA, HA e MPD2, obtidos analiticamente, contra valores de resistência à ruptura por flexão, dados estes, fornecidos pelos fabricantes das cerâmicas testadas.

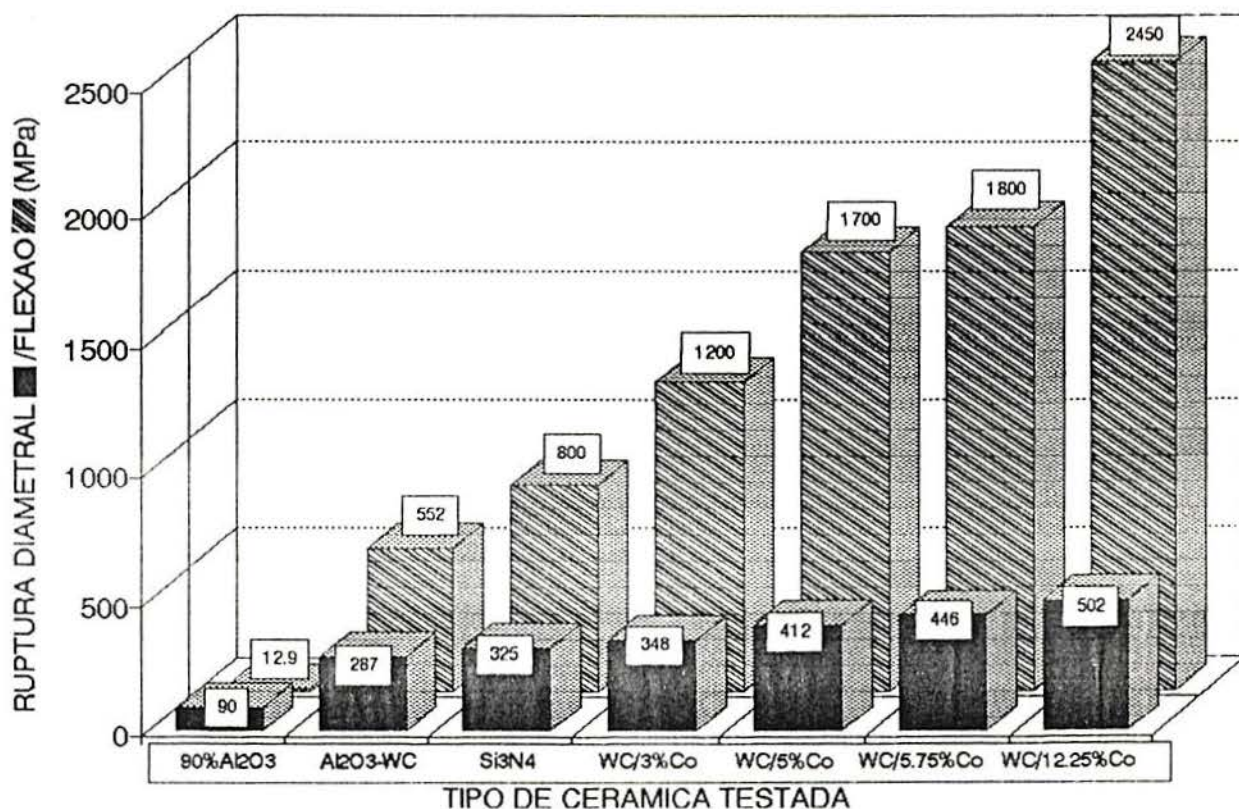


Figura 7.1 - Valores médios de resistência à ruptura por compressão diametral contra a resistência de ruptura por flexão a três pontos, fornecidos pelos fabricantes dos materiais cerâmicos estudados.

Pode-se verificar, entretanto, que os resultados de resistência a compressão diametral são crescentes e estão em conformidade com os valores, também, crescentes, de resistência à ruptura por flexão e assim, estabelecendo uma relação com a tenacidade de cada cerâmica estudada.

Porém, estes resultados de ruptura por compressão diametral, apresentam-se mais conservadores se comparados aos valores de ruptura por flexão. Entretanto, o primeiro ponto da figura 7.1 não segue o mesmo comportamento dos outros materiais testados, isto por tratar-se de uma cerâmica de alta alumina (90%-Al₂O₃) com elevada porosidade. Para este material, de alta porosidade, o ensaio de flexão a três pontos é extremamente severo e com isso resultando em baixos valores de resistência.

Ainda, outro aspecto a ser evidenciado para este tipo de teste, compressão diametral, é proveniente da forma extremamente severa de carregamento do corpo de prova, e que resulta em um gradiente de tensões muito acentuado, provocado pelas tensões de contato ou de Hertz. A análise via elementos finitos confirma esta severidade através das curvas calculadas e apresentadas nas figuras 6.17-(c), 6.18-(a), 6.19-(c) e 6.20-(a).

7.2 METAL DURO (WC - Co)

Deste material foram estudadas as seguintes classes; HF, NHA, HA e MPD2. Foi constatado que a técnica DCM - Direct Crack Measurement, utilizado nas classes de metal duro com teores de Co acima de 5% não apresentam validade. Isto se deve a elevação da ductilidade ocasionada pela ação do Co e,

em consequência, a inibição de formação de trincas, invalidando assim esta técnica, conforme apresentado na figura 6.12. Este efeito da elevação da tenacidade com o crescente teor de Co, e a consequente elevação da resistência a compressão diametral, pode ser visualizada na figura 7.2 e também comparada com a tabela 3.2 que apresenta os dados fornecidos pelo fabricante.

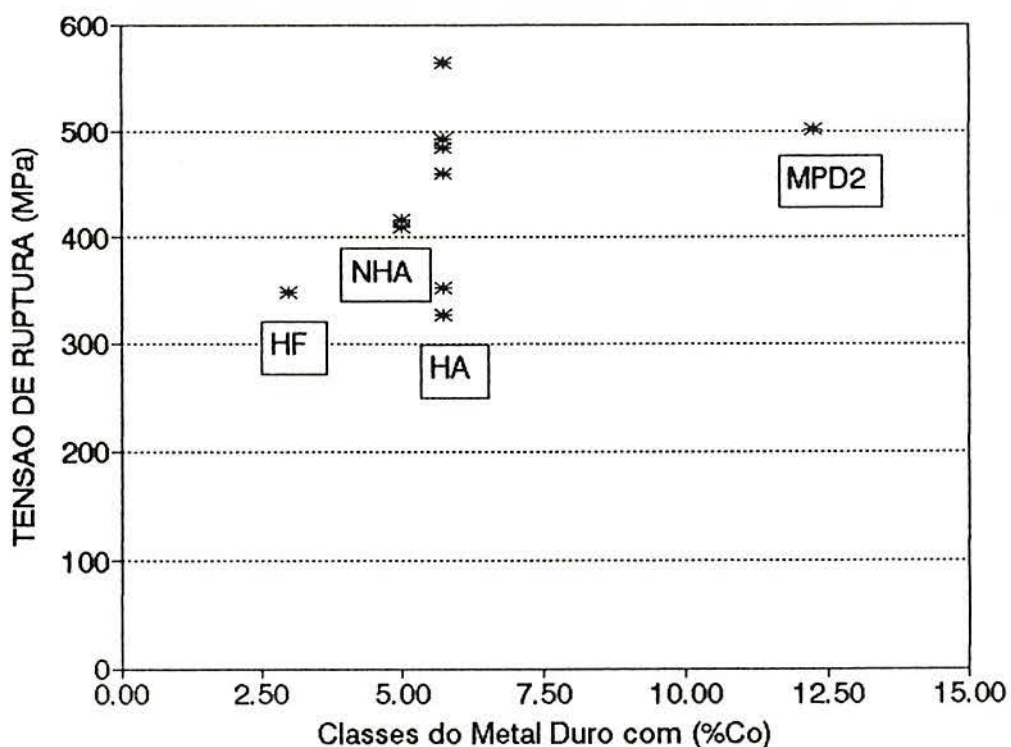


Figura 7.2 - Relação dos respectivos teores de Co das classes HF-3,00%, NHA-5,00%, HA-5,75% e MP2-12,25% do metal duro contra a resistência medida através do ensaio de compressão diametral

Pode-se verificar a repetibilidade dos valores resultantes dos ensaios de compressão diametral realizados nestes materiais através dos registros

apresentados nas tabelas 6.4 até 6.13. Considerando-se que se trata de um estudo experimental, a dispersão verificada está dentro de faixas aceitáveis e, provavelmente, poderia ser até diminuída com a melhoria do processo de usinagem na confecção dos corpos de prova. Nos ensaios de compressão diametral, referentes as quatro classes estudadas, HF, NHA, HA e MPD2 do metal duro, ocorreu uma elevação da resistência na faixa de 350 a 600 [MPa] a qual, está associada com o aumento do teor de Co. Finalmente, a figura 7.2 relaciona a resistência obtida contra o teor de Co; ou seja, o crescente percentual deste metal ligante propicia o aumento da espessura do filme elevando a tenacidade do material.

7.2.1 METAL DURO - Classe HF

Desta classe de metal duro com 3% de Co, foi testado apenas um lote. Os parâmetros de usinagem bem como o acabamento superficial foram mantidos iguais aos outros lotes confeccionados. Os resultados dos ensaios de compressão diametral apresentados na tabela 6.4 e revelam que:

RELAÇÃO D/L ÍNDICE (%) DO DESVIO

9,5/3,2 = 2,9 16,0

Pode-se afirmar que esta classe apresentou a maior dispersão entre as classes do metal duro estudados, assim como as outras cerâmicas estudadas.

7.2.2 METAL DURO - Classe NHA

Desta classe de metal duro com 5% de Co, foram testados dois lotes com variações da dimensão "L" sendo mantido, no entanto, o diâmetro "D". Os parâmetros de usinagem assim como o acabamento superficial foram os mesmos dos outros lotes confeccionados. Os resultados dos ensaios de compressão diametral apresentados nas tabelas 6.5 e 6.6 revelam que:

RELAÇÃO D/L	ÍNDICE (%) DO DESVIO
$12,7/3,3 = 3,8$	1,9
$12,7/4,8 = 2,6$	6,9

7.2.3 METAL DURO - Classe HA

Desta classe de metal duro com 5,75% de Co, foram testados seis lotes com variações nas dimensões "D" e "L". Os parâmetros de usinagem assim como o acabamento superficial foram os mesmos dos diversos lotes confeccionados. Os resultados dos ensaios de compressão diametral apresentados nas tabelas 6.7, a 6.12, revelam o seguinte:

RELAÇÃO D/L	ÍNDICE (%) DO DESVIO
-------------	----------------------

$5,5/2,9 = 1,9$	4,6
$5,5/3,5 = 1,6$	4,7
$9,5/4,1 = 2,3$	1,9
$9,5/2,8 = 3,4$	1,8
$13,1/3,1 = 4,2$	4,5
$13,2/4,0 = 3,3$	9,0

A relação D/L mais favorável está no intervalo entre 2,5 e 3.

7.2.4 METAL DURO - Classe MPD2

Desta classe de metal duro com 12,25% de Co, foi testado apenas um lote. Os parâmetros de usinagem bem como o grau de acabamento superficial foram mantidos iguais aos da confecção das outras classes. Os resultados dos ensaios de compressão diametral apresentados na tabela 6.13 revelam que:

RELAÇÃO D/L	ÍNDICE (%) DO DESVIO
$9,5/3,2 = 3,0$	4,6

Ou seja, esta classe com a relação D/L = 3,0 manteve seu desvio próximo da média das outras classes estudadas.

7.3 Si_3N_4 - NITRETO DE SILÍCIO

Como já era esperado os resultados da técnica DCM realizado neste material cerâmico apresenta uma boa repetibilidade. Quanto aos ensaios de compressão diametral, conseguiu-se confeccionar e testar dois lotes onde foi mantido o diâmetro "D" fixo e variou-se a dimensão "L". Os parâmetros de usinagem assim como o acabamento superficial foram mantidos os mesmos nestes dois lotes confeccionados. Os resultados dos ensaios de compressão diametral apresentados nas tabelas 6.14 e 6.15 revelam que:

RELAÇÃO D/L	ÍNDICE (%) DO DESVIO
$5,0/2,2 = 2,3$	9,0
$5,0/3,0 = 1,7$	10,0

7.4 ALUMINA COM CARBETO DE TUNGSTÊNIO (Al_2O_3 - WC)

Das aluminas estudadas esta, classificada como ferramenta de corte, apresentou a menor dispersão resultando em um desvio de 3,2%. Isto deve-se as suas características físico/mecânicas apresentadas na tabela 3.3. Com uma densidade de $6,9 \text{ g/cm}^3$, função esta do seu processo de fabricação - "Hot Pressing", e conseqüente redução da porosidade. Este material também apresenta

repetibilidade no ensaio de compressão diametral bem como consistência nos valores encontrados pela técnica DCM - , conforme apresentado na figura 6.11 e na tabela 6.16, que revela o seguinte:

RELAÇÃO D/L	ÍNDICE (%) DO DESVIO
$5,3/1,4 = 3,8$	3,2

Neste caso trabalhou-se, também, com uma pequena quantidade de material disponível o que possibilitou a confecção e teste de apenas um lote. Na tabela 3.3, pode-se verificar que esta alumina para ferramenta de corte, se comparada à utilizada na indústria química, apresenta uma resistência à flexão transversal muito maior, 552 MPa contra 12,9 MPa, conforme tabela 6.1. Este melhor comportamento da alumina tipo ferramenta de corte foi confirmado nos ensaios de compressão diametral em que a resistência medida está em 287 MPa contra valores observados de 57 MPa, 82 MPa e 98 MPa para a alumina utilizada na indústria química.

7.5 CERÂMICA DE ALTA ALUMINA (90% - Al_2O_3)

Este tipo de alumina tem sua estrutura com uma elevada porosidade. A técnica DCM - Direct Crack Measurement, não pôde ser utilizada nesta cerâmica pois, as extremidades das trincas formadas pelas indentações se confundissem com os poros. Entretanto, como se dispunha de uma quantidade maior deste tipo

de material, foi possível ensaiar três lotes em compressão diametral. Desta forma, verificou-se a possível relação entre a variação dos desvios com a relação das dimensões D/L. Assim, para este caso específico, pode-se constatar o que segue, conforme mostrado nas tabelas 6.17, 6.18 e 6.19, respectivamente:

RELAÇÃO D/L	ÍNDICE (%) DO DESVIO
$22,5/6,2 = 3,6$	9,6
$6/3 = 2$	7,9
$6/2 = 3$	10,0

A porosidade tem grande influência nas propriedades, principalmente na resistência mecânica e dureza. Na tabela 6.1, apresentam-se os resultados dos ensaios de flexão a três pontos realizados neste material. Pode-se constatar a elevada dispersão dos resultados pois, poros de maiores dimensões ou mal distribuídos são na maioria dos casos, o local de início de fratura, justificando portanto o elevado índice de desvio.

Alguns autores [RKT 74], [ST 76] modelaram matematicamente a influência de uma porosidade muito fina e bem distribuída, chegando a indicar que a resistência à ruptura por flexão nesses casos se dá segundo uma função exponencial. Entretanto, com porosidades maiores e/ou mal distribuídas fica difícil prever os efeitos negativos nos modelos.

7.6 DISCUSSÃO DA ANÁLISE DE TENSÕES - Via Método de Elementos Finitos

Para uma melhor compreensão da discussão referente a análise de tensões via Método de Elementos Finitos realizados nos métodos de ensaios de **Flexão a Três Pontos** e **Compressão Diametral**, passou-se a apresentá-los separadamente.

7.6.1 Flexão a Três Pontos - Análise de Tensões

A figura 6.15(b) apresenta o resultado da curva calculada via método de elementos finitos. O cálculo mostra que foi alcançado um valor da tensão trativa de 13,0 MPa. A comparação pode ser feita com o valor obtido de forma analítica e que resultou em 12,9 MPa, conforme tabela 6.1. Com estes registros pode-se observar uma variação menor que 1% entre as tensões trativas calculadas via análise por elementos finitos e a obtida analiticamente para o ensaio de flexão a três pontos. Comparando as curvas calculadas via elementos finitos, simulando o perfil de distribuição de tensões localizadas **na face** e **no centro** longitudinal do corpo de prova, através das figuras 6.15(c) e 6.16(a) respectivamente, pode-se verificar uma elevação abrupta das tensões compressivas. Tal ocorrência é provocada pela perturbação que está associada as elevadas pressões de Hertz ou pressões de contato.

7.6.2 Compressão Diametral - Análise de Tensões

A aplicação neste trabalho de uma análise linear de tensões via método de elementos finitos teve, inicialmente, um caráter apenas qualitativo. Este método permite uma visualização global da distribuição de tensões e não apenas de um valor isolado de tensão calculado analiticamente. Entretanto, pode-se observar a aproximação com os registros e observações verificadas experimentalmente. Esta análise submetida aos ensaios de compressão diametral foi realizada em dois lotes da cerâmica "Al₂O₃ - Alumina para a Indústria Química". Os corpos de prova tinham os diâmetros de 22,5 mm e 6,0 mm e os resultados estão apresentados nos conjuntos das figuras 6.17, 6.18; e 6.19, 6.20, respectivamente, que serão discutidos a seguir:

- DISCUSSÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL COM DIÂMETRO DE 22,5 mm:

a) - Iniciando pelas figuras 6.17(a) e 6.17(b), pode-se observar a semelhança do contorno geométrico referente à distribuição das tensões trativa e compressiva durante o carregamento até a ruptura com o aspecto da fratura em forma de duas meia luas.

b) - Mesmo não tendo esta análise de tensões um caráter quantitativo,

pode-se verificar também a semelhança entre os valores da tensão trativa máxima de 58 MPa na curva calculada via método de elementos finitos e apresentada na figura 6.17(c), em relação aos valores médios calculados analiticamente, de 57 MPa. De posse dos resultados acima apresentados, pode-se observar uma variação menor que 2% entre as tensões trativas calculadas via análise por elementos finitos e a calculada analiticamente.

c) - Comparando as curvas calculadas via elementos finitos, que apresentam o perfil de distribuição de tensões localizadas na face e no centro longitudinal do corpo de prova, através das figuras 6.17(c) e 6.18(a) respectivamente, pode-se verificar uma elevação em até 60% nas tensões trativas e de 11% das tensões compressivas. Tais ocorrências são provocadas, no caso das tensões trativas, para equilibrar a passagem, de forma abrupta, do gradiente de tensões compressivas para as trativas, localizadas na direção e com o sentido do centro para a face livre do corpo de prova. Já para as tensões compressivas ocorre um pequeno aumento em até 11%, porém no sentido contrário, ou seja, da face livre para o centro do corpo de prova, ocasionado pelas tensões de Hertz e caracterizando o surgimento da triaxialidade em ambas as tensões resultantes, trativas e compressivas.

- DISCUSSÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL COM DIÂMETRO DE 6,0 mm:

a) - Iniciando pelas figuras 6.19(a) e 6.19(b), pode-se observar a

semelhança do contorno geométrico referente à distribuição das tensões trativa e compressiva durante o carregamento até a ruptura com o aspecto da fratura em forma de dupla meia lua.

b) - Mesmo não tendo esta análise de tensões um caráter quantitativo, pode-se observar também a semelhança entre os valores da tensão trativa máxima de 86,5 MPa da curva calculada via método de elementos finitos e apresentada na figura 6.19(c), contra os valores médios determinados analiticamente de 82 MPa, com seus registros na tabela 6.17. De posse destes resultados pode-se observar uma variação menor que 6% entre as tensões trativas calculadas via análise por elementos finitos e as calculadas analiticamente.

c) - Comparando as curvas calculadas via elementos finitos, apresentando o perfil de distribuição de tensões localizadas **na face e no centro** longitudinal do corpo de prova, através das figuras 6.19(c) e 6.20(a) respectivamente, pode-se verificar uma elevação em até 110% nas tensões trativas e de 6% das tensões compressivas. Tais ocorrências são provocadas, no caso das tensões trativas, para equilibrar a passagem, de forma abrupta, do gradiente de tensões compressivas para as trativas, localizadas na direção e com o sentido do centro para a face livre do corpo de prova. Já, para as tensões compressivas ocorre um pequeno aumento em até 6%, porém no sentido contrário, ou seja, da face livre para o centro do corpo de prova, ocasionado pelas tensões de Hertz e caracterizando o surgimento da triaxialidade em ambas as tensões resultantes, trativas e compressivas.

Mesmo diante da forma abreviada da sua aplicação, aborda-se a vantagem da utilização da "ferramenta" que é a análise via método de elementos finitos, a qual possibilitou auxiliar na visualização global de distribuição das tensões e não apenas na obtenção de um valor isolado de uma tensão resultante, como o calculado da forma analítica.

Esta análise, por sua vez, facilitou a seguinte discussão: porque o corpo de prova de cerâmica " Al_2O_3 - Alumina para a Indústria Química", ensaiado em flexão a três pontos suporta uma tensão trativa máxima de apenas 12,9 MPa, enquanto o mesmo material, ensaiado pelo método compressão diametral, suporta tensões numa faixa de 57 a 98 MPa! A análise via elementos finitos mostra que no ensaio de flexão a três pontos, a tensão máxima é alcançada junto a superfície livre do material, localizada na face inferior longitudinal do corpo de prova conforme figura 6.15(a). Esta tensão, entretanto, está agindo diretamente no sentido de "abrir" a face do corpo de prova que está sendo fletida. Qualquer problema de acabamento ou imperfeição do material será refletido como concentrador de tensões, permitindo que a mesma atue junto a esta superfície livre localizada, justamente, na face inferior do corpo de prova. Kreimer [KA 62] afirma que a resistência à ruptura por flexão é determinada pela tensão crítica de propagação das trincas e não pela tensão equivalente reinante no início da formação da trinca.

A figura 6.16(b) mostra independentemente dos valores isolados, as regiões solicitadas a compressão e a tração. Pode-se verificar, entretanto, que no plano "xz" transversal, existe uma predominância do tipo: tensão trativa de 60% (região azul), contra uma tensão compressiva de 40% (região magenta), em relação a área total solicitada.

Já nos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão diametral as tensões trativas são predominantes, conforme mostram as figuras 6.18(b), 6.20(b) e estão distribuídas de uma forma mais homogênea na seguinte proporção: tensão trativa de 85% (região azul), contra uma tensão compressiva de 15% (região magenta), em relação a área total solicitada do corpo de prova. As tensões trativas máximas estão logo abaixo das superfícies comprimidas, localizadas justamente nas regiões de transição das tensões compressivas para as trativas resultantes do carregamento tipo diametral. A fratura tem seu início nestas regiões apesar destas não se caracterizarem por apresentar os máximos picos das tensões.

Diferentemente da situação do corpo de prova submetido a uma solicitação de flexão, é junto a estas superfícies livres que ocorre a existência das tensões trativas na direção longitudinal inferior e, portanto, o local onde se verifica a ocorrência do carregamento combinado e simultâneo tração/flexão. Isto explica porque um corpo de prova de material cerâmico tem uma maior aptidão em resistir solicitações do tipo: primeiro compressivas, depois trativas ou mesmo combinadas atuando junto a uma superfície livre. Entretanto, quando conjuntas à solicitações de flexão baixam sensivelmente a resistência do material. Esta indicação alerta-nos sobremaneira a darmos uma atenção especial aos componentes mecânicos fabricados com materiais cerâmicos quando estes estão solicitados na forma tração/compressão combinados à flexão. Como o projeto nem sempre consegue eliminar tais solicitações, o que seria a condição ideal, e considerando a fragilidade, pela alta sensibilidade a defeitos microestruturais, como porosidade e outros, estas informações passam a ter um papel destacado na confiabilidade dos componentes cerâmicos utilizados em engenharia.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

Conforme já mencionado no desenvolvimento deste estudo, os ensaios tradicionalmente utilizados para a determinação da tenacidade à fratura de um componente apresentam um grande inconveniente quando executados em materiais cerâmicos.

- Primeiro, devido à complexa forma geométrica dos corpos de prova.
- Segundo, pela necessidade de um defeito para simular a pior condição possível de ser encontrada na prática e que nos materiais cerâmicos seria quase impossível obtermos a evolução de uma trinca por fadiga.
- Terceiro, ao grande volume de material necessário para confeccionar o corpo de prova.

Assim, recomendam-se alguns métodos utilizados ao longo deste estudo para a determinação da tenacidade dos materiais cerâmicos, os quais, mostram-se tecnicamente viáveis, de fácil implantação, e que são os seguintes:

- O uso do Ensaio de Compressão Diametral ou "TESTE BRASILEIRO" utilizado para a caracterização de propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos de pequenas dimensões, apresenta-se como uma boa técnica no controle da qualidade destes produtos. Neste trabalho buscamos compreender este método e aplicá-lo aos diversos materiais cerâmicos estudados comparando os resultados entre si e, também, com outros métodos tradicionalmente utilizados. Os resultados dos ensaios de compressão diametral apresentados no capítulo seis, foram tratados estatisticamente segundo recomendação da Norma ASTM B406 - 76/90, são consistentes entre si e com os dados fornecidos pelos fabricantes das cerâmicas estudadas. Aliado a isso, comprova-se que os ensaios realizados nos diversos lotes de materiais cerâmicos testados apresentaram grande repetibilidade. Isto pode ser creditado em parte aos parâmetros de usinagem utilizados para confeccionar os corpos de prova pois, sempre que possível tecnicamente, foi mantido o mesmo grau de acabamento superficial. Finalmente este método desenvolvido por um pesquisador brasileiro, Fernando Carneiro [Ca 37], está consagrado pela sua aplicação em diversos ramos da indústria a nível internacional no controle da qualidade de seus produtos.

- Outro método que tem recebido uma crescente aceitação é o ensaio "DCM - Direct Crack Measurement", devido à grande simplicidade na obtenção das amostras necessárias para a sua realização. Para a determinação da

tenacidade à fratura de alguns materiais cerâmicos estudados, utilizou-se também esta técnica da impressão de dureza. Segundo esta técnica, o tamanho das trincas, associado aos parâmetros para obtenção da indentação é diretamente relacionado ao valor de K_{IC} do material [EC 76] e, mediante o emprego de equações adequadas, [OTF 87] determina-se o valor da tenacidade. Este método porém, não é recomendado, conforme ficou comprovado, para materiais que apresentem uma maior tenacidade, como é o caso do metal duro com elevado teor de cobalto.

- Enfatiza-se com atenção especial, a grande vantagem da utilização de um software apropriado para uma análise de tensões pelo Método de Elementos Finitos - FEM. Esta "ferramenta" possibilitou através de simulação, auxiliar na visualização global do mapeamento de distribuição das tensões e não apenas a obtenção de um valor isolado de uma tensão resultante, como o calculado da forma analítica. Com isso, determina-se de uma forma mais objetiva os diversos níveis das tensões trativas e compressivas atuantes nos corpos de prova dos referidos ensaios durante a aplicação da carga e auxiliando no entendimento dos aspectos da fratura, localização do início destas e a influência das tensões de Hertz na ruptura de um componente.

- Do processo para a obtenção dos corpos de prova, uma vez estabelecidos os parâmetros de usinagem, pode-se afirmar que trata-se de operações de relativa facilidade. Considerando as compatibilidades destas operações com um ferramental adequado composto de máquinas e ferramentas especiais, de baixo índice de vibrações mecânicas e alta performance.

SUGESTÕES

Pode-se enfatizar, também, que de um modo geral há carência de dados das propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos quando submetidos a solicitações em temperaturas elevadas. Assim, sugere-se que este método "Ensaio de Compressão Diametral", por mostrar-se viável e de crescente uso a nível industrial conforme mostrado na pesquisa bibliográfica, seja testado também a quente. A sua simplicidade operacional em comparação com os métodos convencionais, o capacitam para experiências a nível de laboratório, para a execução de ensaios a quente, na determinação da ductilidade dos materiais cerâmicos.

Dos produtos provenientes dos carvões vegetal e mineral, bem como minérios em geral, aglomerados por processos de briquetagem, podem ter suas características físicas/mecânicas acompanhadas por este método.

Da análise de tensões via método de elementos finitos, sugere-se a utilização de outros programas que apresentem uma maior flexibilidade na determinação do modelamento das malhas como por exemplo o software "ANSYS".

APÊNDICE 1

A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A função de distribuição acumulada ou frequência acumulada para distribuição de Weibull $F(X)$ é dada por:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad 1$$

onde: γ = número real; α, β = números reais positivos;

$X \geq \gamma$ e sendo:

α fator de escala;

β fator de forma;

γ fator de localização.

Segundo esta distribuição, para um dado X (que representa a ocorrência de um evento ao qual se atribuem valores), o valor $F(X)$ é a quantidade de valores que são menores ou iguais a X .

Numa amostra composta por n itens, $F(X_i)$ será igual a i/n onde i é o número de itens de valor menor ou igual a X_i e os itens são ordenados de tal forma que o item X_i seja menor que o item $X_{(i+1)}$, sendo $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

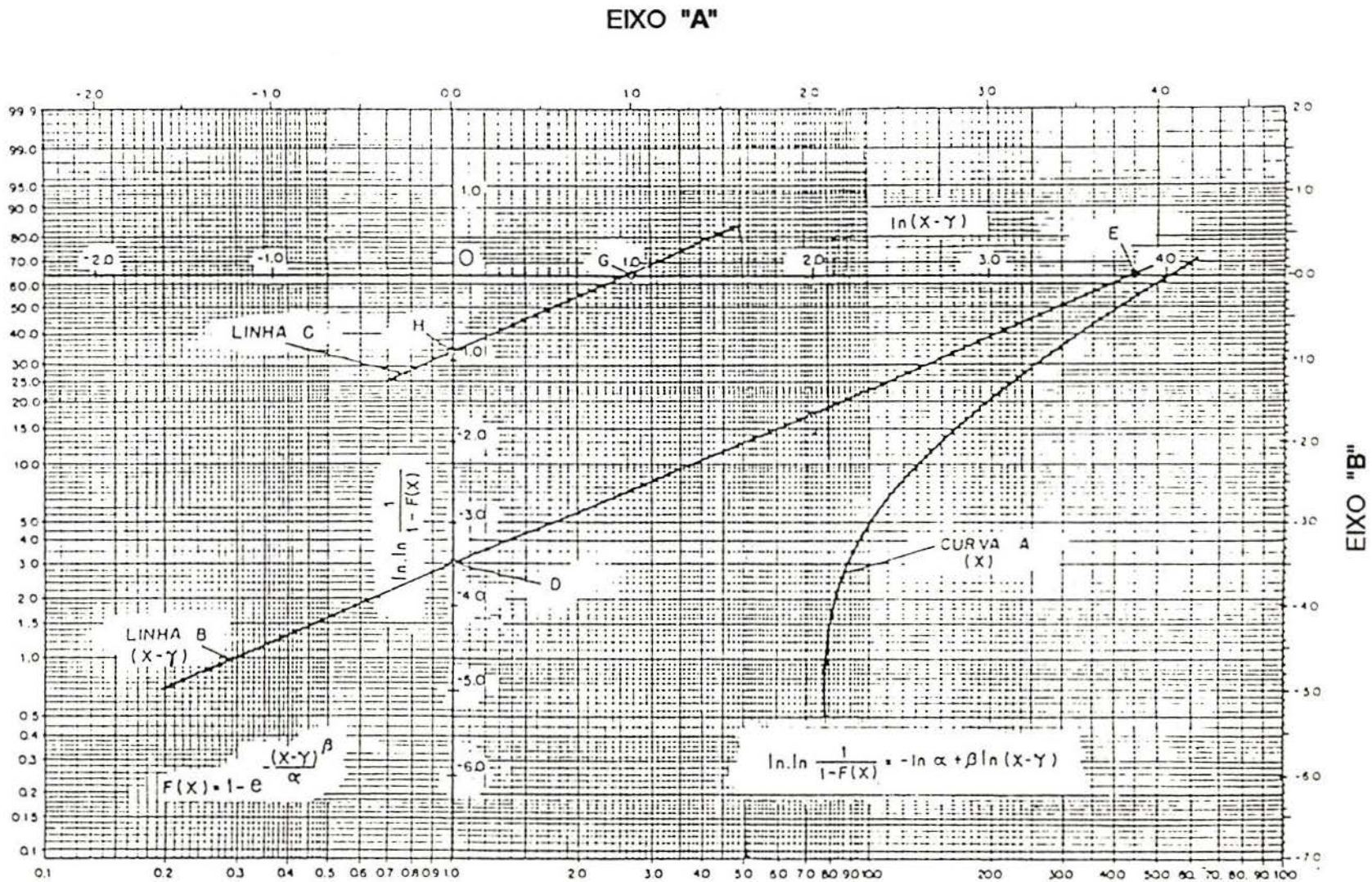
Para essa distribuição é feita geralmente a ressalva que, se a amostra for menor que 15, o valor $F(X_i) = i/(n+i)$, será a média no intervalo (para que a amostra não seja viciada).

A função de distribuição acumulada de Weibull se reduzirá a uma linha reta, se usada uma dupla logaritmação.

Nesse caso tem-se:

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(x)} = -\ln \alpha + \beta \ln(x-\gamma) \quad 2$$

FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA



VARIÁVEIS ASSOCIADA ÀS FALHAS X, (X-γ)

Figura A.1 - Nomograma de Probabilidade de Weibull [Be 64].

Reportando-se às variáveis da expressão anterior (2), vê-se que esta representa a equação de uma reta, de tal forma que se colocadas em um gráfico as variáveis envolvidas (figura A.1), observa-se que a reta em questão intercepta o eixo das ordenadas em $(0, -\ln \gamma)$, sendo a inclinação da reta dada pela variável.

A construção de um gráfico especial, que possibilite a marcação de uma reta em função das variáveis mostradas na expressão (2), é denominado de nomograma de probabilidade de Weibull (Weibull Probability Paper - WPP). Este nomograma está mostrado na figura A.1, onde são indicados:

- $F(X)$ ordenada normal
- $(X - \gamma)$ abscissa normal (escala dos eventos devidamente adaptados)
- $\ln(X - \gamma)$ - abscissa principal
- $-\ln \ln [1/(1-F(X))]$ - ordenada principal

O problema se resume agora em obter os valores $F(X)$ em função dos valores obtidos nos ensaios, para a propriedade genérica a ser avaliada (X).

Na realidade, há quase sempre a necessidade de se adaptar a variável X , para que o nomograma de Weibull possa ser utilizado. Isto é feito associando-se a variável X a um fator γ (fator de localização), passando a ser esta a variável associada às falhas ($X - \gamma$).

Para possibilitar a adaptação dos resultados medidos à distribuição de Weibull, se fazem então mudanças nas variáveis, de tal forma que seja possível associá-las às decadas disponíveis no nomograma de Weibull [Be 64].

Para facilitar o entendimento, mostra-se na figura A.1, numa sequência lógica, o que deve ser feito graficamente para adaptar este tratamento estatístico aos valores medidos.

Inicialmente deve-se colocar no gráfico uma curva (curva A), que represente a frequência de ocorrência da falha em função do valor numérico

obtido durante um determinado ensaio e que está nesse caso associada ao gráfico através da variável (γ). Desta forma se obtém a curva A. Subtraindo-se da variável X um certo valor constante (γ), consegue-se, através do uso da escala logarítmica, encontrar agora, uma linha reta (linha B). Na prática, várias tentativas devem ser feitas para se obter a linha reta B, sendo utilizado o valor de β que mais convier.

O valor de β representa a inclinação da reta B.

Da figura A.1 observa-se que, quando $(X - \gamma) = 0$, então $\ln \alpha = -\ln \ln [1 / (1-F(X))]$. Desta forma o valor β será tomado sobre a ordenada $\ln \ln [1/(1-F(X))]$ quando $(X - \gamma) = 0$, ou seja, o ponto D.

Também na figura A.1 vê-se que, quando $[1 / (1-F(X))] = 0$, então $\ln (X - \gamma) = 0$. Isso é mostrado pelo ponto E.

O valor de β pode então ser expresso por:

$$\beta = \frac{-\left(\ln \ln \left[\frac{1}{1-F(x)}\right]\right) \ln(X-\gamma) = 0}{\ln(X-\gamma) \ln \ln \left[\frac{1}{(1-F(x))}\right] = 0} \quad 3$$

$$\text{ou } \beta = -\frac{D}{E}$$

Outra forma de obter o valor β é lendo diretamente sobre o eixo da ordenada $\ln \ln [1/(1-F(X))]$ o valor H, encontrado pela interseção de uma reta C, paralela à reta B, e que passe pelo ponto G. O ponto G é definido quando o valor $\ln (X - \gamma) = 1$

Desta forma, o valor β passa a ser o valor H com sinal trocado.

Uma vez obtidos esses valores, pode-se obter o valor α . Isto é feito considerando-se que no ponto D sobre a linha B, tem-se:

$$\ln \alpha = -\ln \ln \left[\frac{1}{1-F(x)} \right], \text{ então } \alpha = \frac{1}{\ln \left[\frac{1}{1-F(x)} \right]} \quad 4$$

Uma outra forma seria pela definição da inclinação da reta B, onde: $\alpha = e^{\beta \ln(X-\gamma)}$, uma vez conhecidos.

Com todos esses valores conhecidos, pode-se agora substituí-los na equação (1) de tal forma que se obtém a função de distribuição acumulada F (X) em função dos valores (X - γ) ao se utilizar a reta B, ou em função de X ao utilizar a curva A (feitas as devidas considerações de adaptação de escalas).

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA:

- [Au 83] Ault, N. N. - "Raw Materials for Refractories: SiC and Si₃N₄" , Cer. Sci
ProL. 3 (1983) 186 -191.
- [Ba 87] Batalha, g. f., "Produção e Propriedades Mecânicas de Carbonetos
Sinterizados (Metais Duros WC - Co)", Tese Ms., Florianópolis, 1987.
- [BBR+84] Bell, J.; Brook, R.; Riley, F.; Gregory, G. "New Scientist", 10-22 january,
1984.
- [Be 64] Berretoni, J. N., Practical Aplications of the Weibull Distribution. Industrial
Quality Control, p. 71 - 79, 1964.
- [BZ 83] Bernstein, M.L. & Zaimovsky, V.A.; Mecanical Properties of Metals, 1st
Edition, Mir Publishers, Moscou, 1983
- [Ca 37] Carneiro, F.L.L.B.; "TESTE BRASILEIRO", Instituto Nacional de
Tecnologia, Rio de Janeiro - RJ. 1937.
- [Ca 52] Carneiro, F.L.L.B.; and Aguinaldo, B.; 1952."TENSILE STRENGTH OF
CONCRETE", Union Testing Res. Lab. Mater. Struct., Bull., 13: 97 - 127.
USA.

- [Ca 53] Carneiro, F.L.L.B.; "DOSAGEM DE CONCRETO", Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro - RJ. 1953.
- [CB 80] Conte, S.D.; De Boor, C.; "Elementary Numerical Analysis on Algorithmic Approach", McGraw-Hill, New York, 1980.
- [Ch 78] Child, V.G.; A Evolução Cultural do Homem, 4a edição Zahar Editores, Rio de Janeiro, 1978
- [Di 81] Dieter, G.E.; Metalurgia Mecânica. Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro, 1981.
- [Do 55] Dorr, V.J.; Oberflächenverformungen und Randkräfte bei runden Rollen und Bohrungen. Der Stahibau 24, pp. 202-206.
- [EC 76] Evans, A.G. & Charles, E.A.; Journal Americam Ceramic Societ,59: 371-372, 1976.
- [Fo 22] Foppl, A.; Verlesungen Uber Technische mechanik. 4th Edition, volume 5 of die Die Wichtigsten Der Hoheren Elastizitats Theorie, B. G. Teubner, Leipsiz and Berlin, pp. 342-347.
- [He 95] Hertz, H.; "Gesammelt Werke", Vol. I, Leipzig, 1895.

- [He 96] Hertz, H.R.; Miscellaneous papers. Macmillan, London, pp. 163, 261.
- [Ho 32] Hohl, H. - "Sinterkorund, a New Ceramic Material of Pure Alumina" Ber. D. Ker. Ges. 13 (1982) 70 - 85.
- [Iz 72] Izbicki, R.J.; 1972a. On the Axially Symmetric Plastic Deformation of Coulomb Medium. Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. Tech., 20 (7-8): 547-555.
- [KA 62] Kreimer, G.S.; & Aleksejeva, N.A.; Mechanism of Fracture in Sintered WC-Co Alloys, Physic. Metals Metallography No. 13, p. 117-121, 1962.
- [Ma 90] Marcondes, f. c. , A História do Metal Duro, Sandvick do Brasil S/A, 1990
- [Mr 72] Mroz, Z.; 1972. Mathematical Models of Inelastic Concrete Behavior. In: M.Z. Cohn (editor), Inelasticity and Non-Linearity in Structural Concrete. Symposium, Univ. of Waterloo Press, pp. 47-72.
- [Or 76] Orlov, P., Fundamentals of Machine Design. MIR Publishers, Moscou, 1976.
- [OTF 87] Orange, G.; Tanaka, H.; Fantozzi, G.; Ceramics International, 13: 159-165, 1987.

- [Pa 60] DePater, A.D., On the reciprocal pressure between two elastic bodies. Rolling Contact Phenomena Proceedings of a Symposium held at GM Research Laboratory, Warren, MI, October, 1960. Edited by Bidwell, Elsevier, NY, 1962, pp. 29-75.
- [Pa 62] Paul, B.; 1962. Macroscopic Criteria for Plastic Flow and Brittle Fracture. In: H.Liebowitz (editor), Fracture, an Advanced Treatise, 2. Academic Press, London, pp. 313-496.
- [Pa 91] Paschoal, J., O., "Zircônia Made in Brazil", Meios & Métodos - Micronal S/A - Ano XIII - N.67p. 6-9, 1991.
- [Pe 82] Petrucci, E.G.R.; Concreto de Cimento Portland, 9a. edição, Editora Globo, Porto Alegre - Rio de Janeiro, 1982.
- [Pl 62] Plait, A., "The Weibull Distribution - Industrial Quality Control", p. 17 - 26, 1962.
- [Po 50] Poritsky, H.; Stress and Deflections of cylindrical bodies in contact with application to contact of gears and locomotive Wheels. J. Appl. Mech. Vol. 17 (191-201), (465-486).
- [Po 81] Popper, P. - "Twenty-one Years of Special Ceramics", Preface to the Proceedings of Special Ceramics 7, Held at Bedford College, London, 15 - 18th December 1980, Proc. Brit. Cer. Soc. 31 (1981), VII - IX.

- [PS 71] Patrick, J.W., & Stacey, A.E., "The Strength of Industrial Cokes: Part 1. Variability of Tensile Strength in Relation to Fissure Formation", British Coke Research Association, Derbyshire, UK (Received 5 April 1971). FUEL, 1972, Vol 51, January p.81-87.
- [RKT 74] Romanova, N.J.; Kreimer, G.S. & Tumanov, V.J.; Effects of Residual Porosity on the Properties of WC-Co Hard Alloys. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics No. 13 p. 670-673, 1974.
- [RY 76] Roark, R.J., & Young, W.C., Formulas for Stress and Strain, 5a. Ed. McGraw-Hill Book Co., USA, 1976.
- [Sa 89] Santos, J.N., "Desenvolvimento de Metais Duros sem Cobalto", tese doutorado, Florianópolis, 1989.
- [Sh 49] Shtaerman, Ya. I. The contact problem of elasticity theory (in Russian). Moscow-Leningrad, p. 97-98.
- [Sh 63] Shigley, J.E. Mechanical Engineering Design. Third Edition, McGraw-Hill Book Co., USA, 1963.
- [Sh 76b] Sherif, S.M. The Quasi-static Contact Problem for Nearly-imcompressible Agricultural Products. Agricultural Engineering Department - Michigan State University. 1976b. Thesis (Ph.D).

- [Sn 73] Snobar, B. Engineering Paramentes Related to the Hardness of Carrots. Unpublished Ph.D. Disertation. Michigan State University, USA, 1973.
- [So 82] Souza, S.A.; Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos. Edgard Blucher, São Paulo, 1982.
- [SS 62] Seely, F.B., & Smith, J.O., Advanced Mechanics of Materials. John Wiley & Sons, London, 7a. Ed., 1962.
- [SSF 76a] Sherif, S.M.; Segerlind, L.J.; Frame, J.S., An Equation for the Modulus of Elasticity of a Radially Compressed Cylinder. Transactions of the ASAE, 19(4):782-785, 1976a.
- [St 89] Stemmer, C. E., Ferramentas de Corte, Editora da UFSC, Florianópolis - SC, 1989.
- [ST 76] Suzki, H. & Tanage, T., Effects of Carbide Grain Size and Binder Content on the Strength of WC-Co Cemented Carbides Relating to Structural Defects. Planseeberichte Für Pulvermetallurgy No. 24, p. 271-279, 1976.
- [TG 70] Timoshenko, S.P. & Goodier, J.N. Theory of Elasticity. Third Edition. McGraw-Hill Book Company, USA, 1970. p.418-419.
- [UL 82] Uribe, M., & Lu, W.K., "Effects of Inert Carbonaceous Assitives on Coke Properties", Ironmaking and Steelmaking, 1982, Vol.9, No.4, p.145-149.

NORMAS TÉCNICAS CONSULTADAS:

[ABNT 58] Associação Brasileira de Normas Técnicas - MB-212. 1958, "Resistência à Tração Simples de Argamassas e Concreto por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos".

[ABNT 83] Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR - 7222, 1983, "Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos".

[ASAE 1976a] "An Equation for the Modulus of Elasticity of a Radially Compressed Cylinder". ASAE , 19 (4), 782 - 785, 1976a.

[ASTM 65] ASTM - B 378, "Transverse Rupture Strength of Sintered Metal Friction Materials", 1965, (Reapproved em 1985).

[ASTM 65] ASTM - C 294, "Constituents of Natural Mineral Aggregates", 1969, (Reapproved em 1975).

[ASTM 75] ASTM - C 78, "Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Third- Point Loading)", 1975.

[ASTM 76] ASTM - B 406, "Transverse Rupture Strength of Cemented Carbides", 1976, (Reapproved em 1982).

[ISO 75] ISO 3327 - Hardmetals - Determination of Transverse Rupture Strength, 1975.