

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS SUL E SULDESTE DO PARÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ADILTON ROCHA DA SILVA

**ANÁLISE DE FALHA EM HASTES PARA BROCAS EMPREGADAS
NA PERFURAÇÃO DE ROCHAS**

**MARABÁ
2013**

ADILTON ROCHA DA SILVA

**ANÁLISE DE FALHA EM HASTES PARA BROCAS EMPREGADAS
NA PERFURAÇÃO DE ROCHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. Me. Marcio Corrêa
de Carvalho

MARABÁ
2013

ADILTON ROCHA DA SILVA

**ANÁLISE DE FALHA EM HASTES PARA BROCAS EMPREGADAS
NA PERFURAÇÃO DE ROCHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. MSc. Marcio
Corrêa de Carvalho

Data de aprovação: 27 de março de 2013

Banca examinadora:

Prof. Msc. Márcio Corrêa de Carvalho

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra

Prof. Dr. Edinaldo Teixeira

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA

Silva, Adilton Rocha da

Análise de falha em hastes para brocas empregadas na perfuração de rochas / Adilton Rocha da Silva ; orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. — 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2013.

1. Britadores - Análise. 2. Máquinas de perfuração. 3. Rochas. I. Carvalho, Márcio Corrêa de, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 622.23

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA

Reitor: Prof. PHD. Carlos Edilson de Almeida Maneschy

Vice-Reitor: Prof. Dr. Horacio Schneider

Diretor da Faculdade: Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra

Dedico este trabalho de conclusão de curso, aos meus pais, dona Helenice Rocha da Silva e José de Ribamar Bezerra da Silva, pelo apoio, confiança e paciência durante minha graduação. Dedico ainda a Jaciara Silva da Silva que também teve um papel muito importante no último ano de curso.

AGRADECIMENTOS

Uma vez dois ratinhos passeavam pela cozinha em busca de alimento, quando de repente caíram em balde de nata. Então, por instinto, eles começaram a nadar. Eles nadaram e nadaram... O primeiro ratinho, já cansado, logo desistiu e se afogou. O segundo continuou a nadar. Ele já estava bastante cansado, porém, a sua vontade de viver não o deixava desistir. De repente, como num passe de mágica, toda aquela nata se transformou em manteiga e então ele pode sair.

Claro que todos nos queremos ser o segundo rato, no entanto, poucos são os que conseguem, pois o cansaço, a fadiga, e até mesmo o comodismo nos fazem desistir facilmente de nossos objetivos. Tentar algo novo e ir mais além nem sempre é tão fácil como dizem, existem barreiras difíceis de serem vencidas, nem sempre, só “nadar” muito não é o suficiente, porque os obstáculos exigem muito mais que esforço físico.

Portanto, agradeço a Deus por mais esta vitória, pois Ele está acima de tudo e conhece nossos caminhos e nossas necessidades. Josué 1:9 “... Seja forte e corajoso, não temas, nem desanime, porque o Senhor, teu Deus, é contigo por onde quer que andares”. Com Ele tudo é possível.

Agradeço aos meus pais, meus irmãos, tios e avós, que foram fundamentais para dar força e ânimo. Agradeço aos meus colegas que contribuíram bastante durante os cinco anos de graduação. São eles: Adriano Rafael, Bruna Soares, Dimereis Rosa, Jobeane Braga, Mayron Saminez, Mara Cristina e Viviane Costa. Para mim, mim muitas destas pessoas representam o espírito santo, que nos renova e diz “Desiste não, continue ‘nadando’, sua vitória está logo à frente, você pode não está vendo, mas está lá”.

Agradeço também a técnica do laboratório de cerâmica, Tatiani, pela paciência. Agradeço ainda a toda a equipe de professores da Faculdade de Engenharia de Materiais.

Agradeço a Universidade Federal do Pará pela oportunidade.

RESUMO

Em meio a diversos equipamentos utilizados na extração e exploração de minérios, o conjunto haste e broca têm vasta utilização e importância na busca de novas jazidas. As brocas são equipamentos empregados em trabalhos pesados sobre condições severas de solicitações mecânicas e abrasivas, são responsáveis pela perfuração de diversos tipos de solos, como exemplo rochosos. As hastes trabalham em conjunto com as brocas, possibilitando o alcance de grandes profundidades. A Reinaldo Mineração encaminhou ao LED (Laboratório de Ensaio Destrutivos, da, FEMAT – Faculdade de Engenharia de Materiais, CAMPUS Marabá – nesta época coordenado pelo Pro. Msc. Márcio Corrêa), cinco hastes fraturadas, para serem realizadas a análise das falhas, com objetivo de determinar as possíveis causas que as levaram a falhar. Para isto foram realizadas análise visual, análise química, metalografia, MEV e ensaio de microdureza. De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que o processo e/ou técnicas empregadas na fabricação das hastes não proporcionam produtos de boa qualidade e eficientes.

Palavras-chave: Haste de broca, Análise de Falha, Fratura em Metais, Caracterização de Metais.

ABSTRACT

Among the various equipment used in the extraction and exploration of minerals, the drill and rod assembly have wide use and importance in the search for new deposits. The drills are heavy duty equipment used in harsh conditions on mechanical stresses and abrasive, are responsible for drilling of various types of ground, for instance rocky. The rods working in conjunction with the drills, enabling the achievement of greater depths. The Reinarda Mining forwarded to the LED (Destructive Testing Laboratory, da FEMAT - School of Materials Engineering, CAMPUS Marabá – at this time coordinated by Prof. Msc. Márcio Corrêa), five fractured rod drills, to be performed the analysis of failures, in order to determine the possible causes that led to fail. To this were done visual analysis, chemical analysis, metallography, SEM and microhardness test. According to the results, it can be stated that the method and / or techniques used in the fabrication of the rods do not provide good quality products and efficient.

Key words: Rod Drills, Failure Analysis; Fracture in Metals, Characterization of Metals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Tipos de haste -----	06
Figura 02: Exemplo de brocas -----	06
Figura 03: Solicitações na haste -----	07
Figura 04: Esquema do processo de extrusão -----	08
Figura 05: Cementação -----	08
Figura 06: Diagrama FeC -----	10
Figura 07: Aquecimento superficial por indução, austenitização -----	11
Figura 08: Resfriamento superficial rápido, para obtenção da martensita -----	11
Figura 09 - Fluxograma Metodologia utilizada no trabalho -----	12
Figura 10: Amostras a serem analisadas -----	13
Figura 11: Vista isométrica da posição dos cortes para obtenção dos CPs -----	13
Figura 12: Amostras cortadas para análises -----	14
Figura 13: Corpo de prova com ataque nital 2% -----	16
Figura 14: Esboço da macrografia com camada cementada -----	16
Figura 15: Melatografia CP1 -----	17
Figura 16: Melatografia CP2 -----	17
Figura 17: Melatografia CP3 -----	17
Figura 18: Melatografia CP4 -----	18
Figura 19: Melatografia CP5 -----	18
Figura 20: Esquema de 1ndentações para dureza -----	19
Figura 21: Gráfico de Médias de Microdureza Vickers -----	20
Figura 22: Inclusão na superfície da fratura, e formação de degraus -----	21
Figura 23: Detalhes da inclusão com microtrincas -----	21
Figura 24: Gráfico de spectrum EDS CP1 -----	22
Figura 25: Detalhe da rugosidade da superfície -----	22
Figura 26: Início da trinca com inclusão -----	23
Figura 27: Detalhe inclusão início da fratura -----	23
Figura 28: Rugosidade na superfície de fratura -----	24
Figura 29: Trincas observadas com aumento de 400 x -----	24
Figura 30: Inclusão seguida de diversas trincas -----	25
Figura 31: Detalhes da inclusão na superfície fraturada -----	25
Figura 32: Gráfico de spectrum EDS CP2 -----	26
Figura 33: Superfície de falha danificada -----	26
Figura 34: Superfície de falha CP5 -----	27
Figura 35: Poros na superfície de falha do CP3 -----	27
Figura 36: Poros na superfície de falha do CP3 -----	28
Figura 37: Início da Fratura CP3 -----	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO -----	04
2. JUSTIFICATIVA -----	05
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	05
3.1. Hastes para brocas -----	05
3.2. Extrusão -----	08
3.3. Cementação -----	09
3.4. Têmpera -----	09
4. METODOLOGIA -----	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES -----	12
5.1. Inspeção visual -----	12
5.2. Preparação dos corpos de prova -----	13
5.3. Análise química -----	14
5.4. Metalografia -----	15
5.5. Análise de dureza -----	19
5.6. Microscopia eletrônica de varredura -----	20
6. CONCLUSÃO -----	31
REFERÊNCIAS -----	32

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é detentor de uma imensa quantidade de riquezas naturais: uma delas é o minério. O país se destaca principalmente na produção de ferro, bauxita (alumínio), ouro, etc. No Brasil, no século XVIII, as minas de ouro tiveram grande importância e as primeiras minas foram descobertas em Minas Gerais. Atualmente, a maior mina de ouro em operação localiza-se em Paracatu-MG, e é controlada por uma empresa canadense e o produto é exportado. O ouro geralmente está associado a minerais e a rochas, e para sua extração e beneficiamento faz-se necessário à utilização de equipamentos pesados. O Brasil, atualmente é o sétimo maior produtor mundial de ouro e este metal que é comercializado em forma de barras ou em jóias. Isto se deve a grandes investimentos em pesquisas e equipamentos com tecnologias avançadas que permitam a localização de novas jazidas e a exploração com máxima eficiência do potencial das minas.

A utilização de equipamentos adequados para cada tipo de material a ser extraído é de fundamental importância para obterem-se melhores resultados. Diariamente, novos equipamentos modernos e sofisticados, são introduzidos no mercado, e a escolha do melhor equipamento depende de muitas variáveis, como o custo, mão de obra especializada e, sobretudo conhecimento de suas propriedades limitadoras relacionadas às condições de serviços as quais esses equipamentos serão submetidos.

Em meio a diversos equipamentos utilizados na extração e exploração de minérios, o conjunto haste e broca têm vasta utilização e importância na busca de novas jazidas. As brocas são equipamentos empregados em trabalhos pesados sobre condições severas de solicitações mecânicas e abrasivas, são responsáveis pela perfuração de diversos tipos de solos, como por exemplo, rochosos. As hastes trabalham em conjunto com as brocas, possibilitando o alcance de grandes profundidades de perfuração, e também estão sujeitas a grandes solicitações mecânicas.

Alguns projetos de exploração de ouro no sudeste do Pará se dão em solos rochosos e os equipamentos de perfuração são bastante utilizados tanto na etapa de pesquisa e exploração quanto na etapa de extração. Com isso, há um grande consumo de hastes e brocas, por desgaste, e frequentemente esses materiais falham.

A falha nas hastes esta relacionada a atrasos na produção devido ao tempo necessário para a substituição destes equipamentos, elevação dos custos com aquisição de novos componentes. Desse modo, foram encaminhadas ao LED (Laboratório de Ensaio Destrutivos, da, FEMAT – Faculdade de Engenharia de Materiais, CAMPUS Marabá – nesta época coordenado pelo Prof. Msc. Márcio Corrêa), cinco hastes fraturadas, para serem realizadas as análises de falha, com objetivo de determinar as possíveis causas que as levaram a falhar.

Após análises como microdureza Vickers, metalografia, MEV, foi possível concluir que as hastes têm uma série de defeitos provenientes do processo de fabricação, como por exemplo, poros, inclusões, não linearidade nos tratamentos térmicos, entre outros. Estes tipos de defeitos geram pontos de concentrações de tensões de onde se iniciará a falha por fadiga, reduzindo assim o tempo de vida útil dessa ferramenta.

2. JUSTIFICATIVA

As hastes de brocas são ferramentas importantes no processo de exploração e extração de minério. A falha deste equipamento implica em atraso na produção devido o tempo necessário para a substituição destes equipamentos além da elevação de custos. A análise da falha permitirá a identificação dos motivos que as levaram a falhar, melhorando assim todo o processo, desde a aquisição da ferramenta aos métodos de aplicação.

Desse modo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo caracterizar a composição química, macroestrutura (macrofractografia), microestrutura e dureza de cinco hastes pra brocas utilizadas na extração de minério de ouro, visando a determinação das possíveis causas que as levaram a falhar.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. HASTES PARA BROCAS

As hastes para brocas são equipamentos que possibilitam atingir grandes profundidades de perfuração. Seu material de fabricação pode ser de diferentes composições proporcionando propriedades mecânicas voltadas a diversos tipos de

solicitações. Quanto à geometria, tem seção transversal cilíndrica ou sextavada e são vazadas longitudinalmente.

Existem três tipos de hastes^[1], Figura 01, as hastes simples são conectadas diretamente com a broca e com o equipamento e são utilizadas para perfurações de pequenas profundidades, as pontas de hastes para extensão, com uma extremidade para acoplar ao equipamento e hastes de extensão que são adicionadas de acordo com a profundidade que se precisa atingir. Há também, os conectores para fazer a ligação entre as hastes.

FIGURA 01 – Tipos de haste. (a) haste simples; (b) ponta de haste para extensão; (c) extensão e (d) conector para haste.



Fonte: Global Product Catalogue - www.boartlongyear.com, 2009.

A Figura 02 mostra três tipos de brocas utilizadas na perfuração de solos.

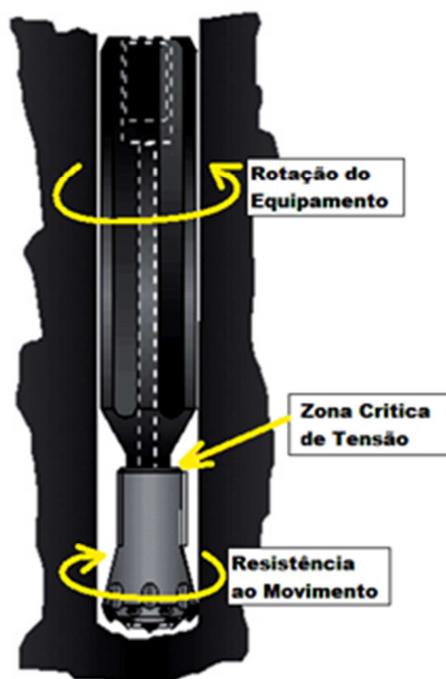
FIGURA 02 – Exemplo de Brocas.



Fonte: Global Product Catalogue - www.boartlongyear.com, 2009.

Esse tipo de ferramenta trabalha sob grandes solicitações mecânicas como, por exemplo, torção, além de flambagem. A torção nas hastes ocorre devido ao torque gerado pelo equipamento propulsor e a resistência ao movimento gerada pelo atrito entre a broca e o solo, Figura 03.

FIGURA 03 – solicitação na haste



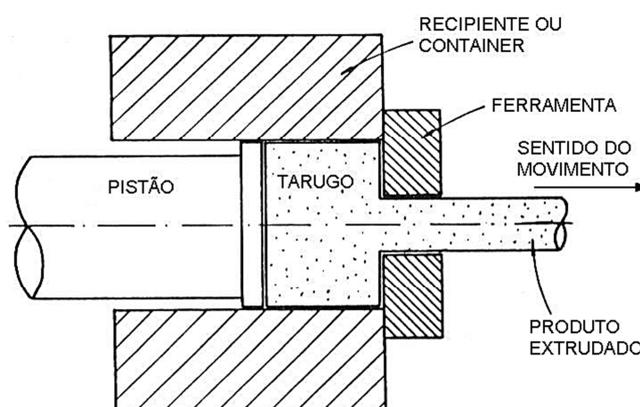
Fonte: (a) Global Product Catalogue - www.boartlongyear.com (b) Resistência dos Materiais – Universidade Fluminense (Editada), 2009

Uma zona de tensão crítica é gerada no encaixe haste-broca, isso se deve a redução da geometria da haste em formato de cone até o início da rosca e esta configuração gera concentração de tensão neste ponto. Todas as fraturas analisadas aconteceram neste ponto. Além disso, há fatores que contribuem diretamente para a falha, como por exemplo, folgas no encaixe, flambagem por excesso de carregamento, flexão por deslizamento, rotação excessiva, broca não apropriada ao solo ou etapa de perfuração, perfuração em vazios ou trincas entre rochas, etc.

3.2. EXTRUSÃO

Devido sua geometria complexa, as hastes são fabricadas pelo processo de extrusão, Fig. 04. Nesse processo de conformação mecânica, um bloco de metal é forçado a passar através do orifício de uma matriz sob alta pressão, de modo a provocar a redução de sua seção transversal^[2]. Por esse processo são fabricadas barras cilíndricas, tubos e materiais com formas de seção transversal irregular.

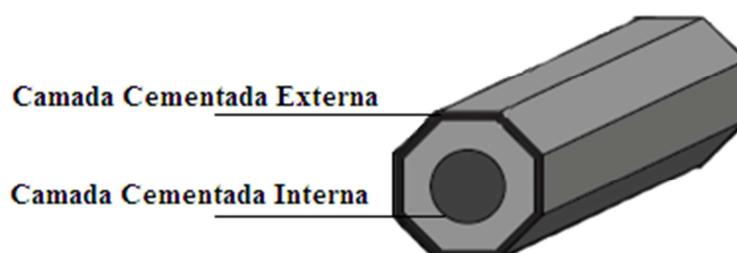
FIGURA 04 - Esquema do processo de extrusão.



Fonte: <http://www.ebah.com.br/extrusao-doc-a2399.html>, 2012

A BoartLongyear, uma das empresas fornecedoras de hastes para a Reinarda Mineração, após a etapa de conformação, submete as hastes ao tratamento termoquímico de cementação para obter uma superfície externa e interna com maior concentração de carbono que a região intermediária, Fig. 05. Em seguida, as extremidades das hastes são submetidas ao endurecimento superficial por indução objetivando maiores resistências a torção e à fadiga.

FIGURA 05 - Cementação.



Fonte: Global Product Catalogue - www.boartlongyear.com, 2009.

3.3. CEMENTAÇÃO

Consiste na difusão de carbono na superfície do componente, aquecido em temperaturas suficientes para produzir a microestrutura austenítica^[3,4]. A cementação é realizada somente em aços baixa-liga e pode ser classificada de acordo com o meio empregado para a difusão de carbono. Assim, tem-se: cementação gasosa, cementação líquida e cementação sólida. A cementação gasosa é o processo mais eficiente, pois permite cementar com maior uniformidade e com mais economia de energia. O gás utilizado é o propano ou gás natural para geração de carbono e é realizado em temperaturas entre 850 a 950°C. A cementação líquida utiliza sais fundidos ricos em carbono como, cloreto de sódio, cloreto de bário, cloreto de potássio e cianeto de sódio. Os sais se fundem a 650° C. O processo acontece com tempo de duração entre 1 a 30 horas e atinge-se camada entre 0,2 a 3,0 mm. Na cementação sólida a peça é colocada em caixa de aço contendo substâncias ricas em carbono como; carvão, coque, carbonato de cálcio, grafite em pó, etc. A temperatura de trabalho é entre 900 a 950° C e o tempo de permanência é de 1 a 30 h atingindo-se uma camada entre 0,2 a 3,0 mm.

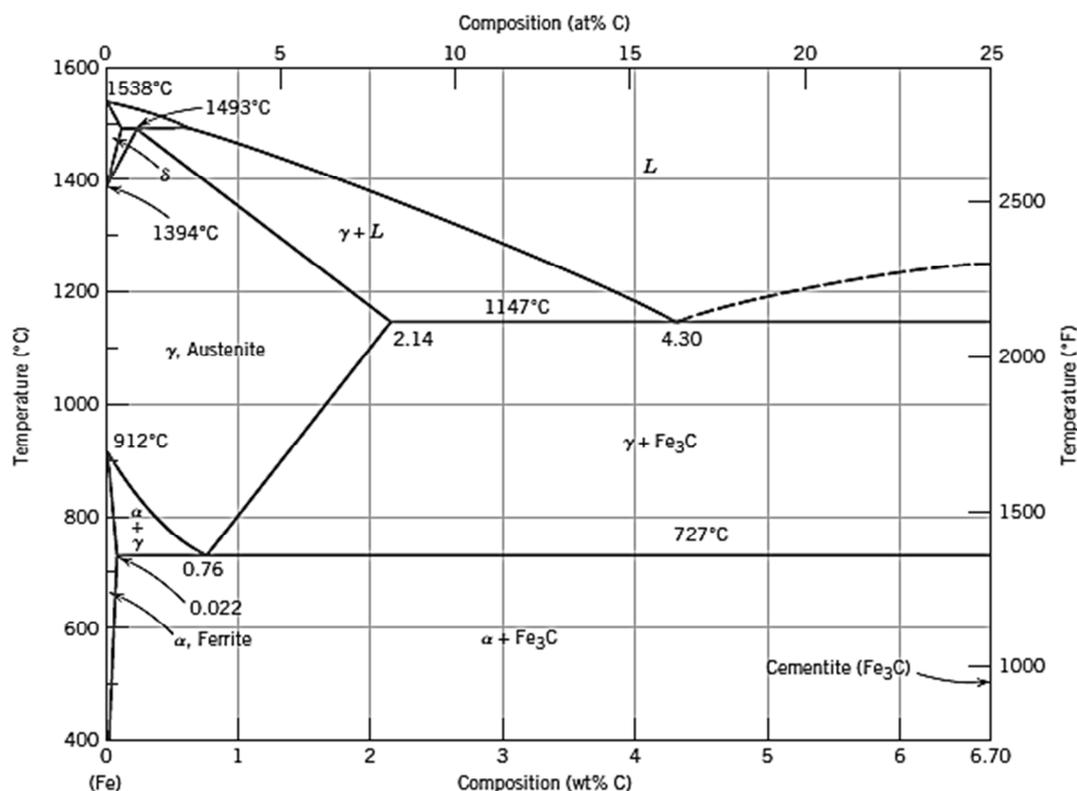
3.4. TÊMPERA

A têmpera caracteriza-se por um resfriamento rápido (alguns segundos) a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenita, essa temperatura dependerá da composição do aço^[3,4], Fig. 06. A têmpera é habitualmente realizada utilizando água, salmoura ou óleo como meio de refrigeração. A têmpera pode ser total ou superficial.

A têmpera superficial produz regiões endurecidas na superfície do componente (de microestrutura martensítica) de elevada dureza e resistência ao desgaste, sem alterar a microestrutura do núcleo.

Têmpera por indução: é realizado por meio de indução eletromagnética. O tempo de aquecimento é da ordem de segundos. O resfriamento é realizado com água, salmoura ou óleo por meio de spray ou imersão.

FIGURA 06 – Diagrama FeC.



Fonte: Materials science and engineering : an introduction / William D. Callister, Jr.—7th ed.p. cm, 2007.

Se uma corrente alternada passa por uma bobina, estabelece-se nesta um campo magnético alternado, o qual induz um potencial elétrico na peça a ser aquecida. Como a peça é um circuito fechado, a tensão induzida provoca um fluxo de corrente. A resistência à passagem desta corrente provoca o aquecimento da região a ser temperada, Figura 07.

Camadas temperadas com profundidade entre 0,3 a 1,5 mm (dureza entre 58 e 62 HRC) oferecem boa resistência ao desgaste em componentes submetidos a tensões leves e moderadas. Nestes casos, a profundidade de austenitização pode ser controlada empregando-se frequências entre 10 kHz e 2 MHz, densidades de potência na bobina entre 800 e 8000 W/cm² e tempos de aquecimento inferiores a 10s.

O spray para realização do resfriamento, Figura 08, é um elemento crítico do processo de têmpera. O resfriamento pode ser por imersão, na qual a peça aquecida é imersa no líquido de têmpera ou do tipo spray (“chuveiro”) na qual somente a região aquecida é resfriada. Um spray fraco ou incorreto poderá resultar em dureza irregular e o auto revenimento poderá causar uma camada temperada com baixa

dureza. O tipo de spray e o tipo de fluido de resfriamento, a ser utilizado, dependem do tipo e da composição química do aço, da profundidade especificada para a camada, da forma construtiva da peça (geometria e dimensões). A água é o fluido mais utilizado neste tipo de tratamento, pois em situações particulares, a água também pode ser utilizada para resfriamento do indutor. Utiliza – se o resfriamento com polímero ou óleo, quando o resfriamento rápido com água poderá causar trincas ou distorção na peça.

Quando uma peça é temperada por indução, com processo estático ou progressivo, em alguns casos é possível reter energia térmica suficiente no núcleo da peça temperada superficialmente, para realizar o auto revenimento da camada temperada, se necessário. O controle deste tipo de processo exige alto grau de especialização, bem como, total controle das operações antecedentes.

FIGURA 07 – Aquecimento superficial por indução, austenitização.



Fonte: Tratamentos Térmicos - prof. Nivaldo J. Martim

FIGURA 08– Resfriamento superficial rápido, para obtenção da martensita.

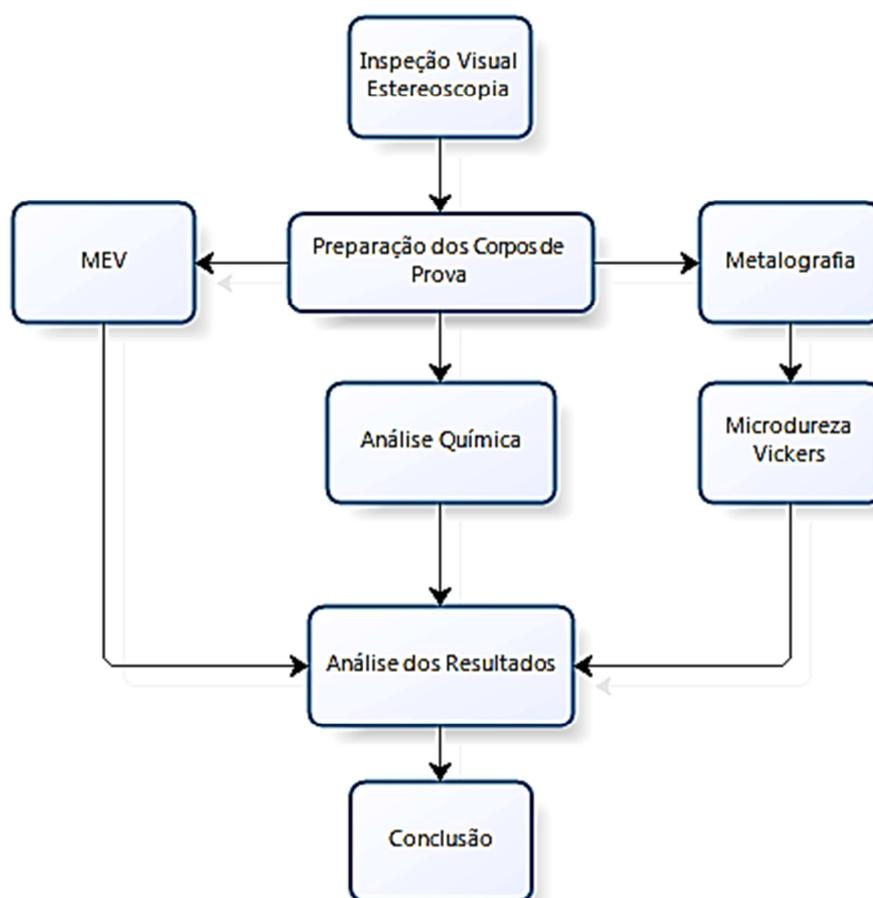


Fonte: Tratamentos Térmicos - prof. Nivaldo J. Martim

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada na análise da falha nas hastes está representada no fluxograma da Figura 09.

FIGURA 09 - Fluxograma Metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: Autor, 2012.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. INSPEÇÃO VISUAL

Foi realizada inspeção visual para verificação macroestrutural das fraturas com auxílio de estereoscópio^[5]. Onde se verificou que apenas três amostras tiveram a superfície de fratura preservada e todas com grau de oxidação elevado. As hastes apresentam formas de haste sextavada com redução cônica seguida de rosca de passe largo para encaixe da broca ou da haste de extensão, além de furo central

longitudinal para refrigeração, limpeza e remoção de fragmentos de solos provenientes da perfuração, Figura 10.

FIGURA 10 – Amostras a serem analisadas.

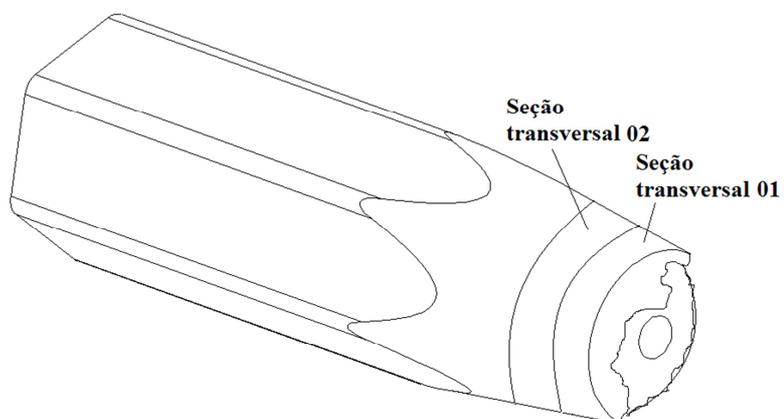


Fonte: Autor.

5.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Seguiu-se a preparação das amostras para a análise química, análise de dureza, estereoscopia, metalografia e microscópio eletrônico de varredura ^[5,6]. Para isso as amostras foram cortadas em dez unidades, Figura 12, cinco da superfície de fratura, seção transversal 01, para estereoscopia e MEV e cinco para as demais análises, seção transversal 02, Figura 11.

FIGURA 11 – Vista isométrica da posição dos cortes para obtenção dos CPs.



Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 12 – Amostras cortadas para análises.



Fonte: Autor, 2012.

5.3. ANÁLISE QUÍMICA

Foi realizada a análise química das amostras, na empresa SINOBRAS, onde se determinou a porcentagem de cada elemento químico que as compõe e os resultados da análise estão na Tabela. 01.

As amostras apresentaram composição química de aço-cromo-níquel, SAE 3325^[7], com porcentagem média de carbono em torno de 0,26 %, cromo 1,30 % e níquel 3,18 %. Com relação a propriedades químicas e físicas, o cromo atua como um antioxidante e aumenta a dureza da liga e resistência a desgaste por abrasão. O níquel melhora significativamente a capacidade de têmpera, possibilitando redução da velocidade de resfriamento, além de elevar à dureza do aço e aumentar a resistência à abrasão.

Considerando a ferramenta analisada, haste para brocas, os elementos de maior relevância, apresentados na tabela 01, são: o carbono, o cromo, o níquel e o manganês, pois estes elementos são os responsáveis pelas principais características do aço, como por exemplo, resistência à tração, torção, abrasão, corrosão, entre outras ^[8].

Aços com aproximadamente de 12% de cromo têm elevada resistência à corrosão a vários ácidos. O cromo também aumenta a resistência à tração, em

média 80 MPa para cada 1% de cromo, melhora a temperabilidade, aumenta a resistência em trabalhos a quente e ao desgaste por abrasão. O níquel aumenta a resistência à tração dos aços, no entanto, o limite de elasticidade é o mais favorecido. Melhora significativamente a temperabilidade, possibilitando redução da velocidade de resfriamento. Também, o níquel altera a alotropia do ferro e teores acima de 25% fazem reter a austenita em temperaturas usuais, fazendo um aço austenítico, que é não magnético e bastante resistente à corrosão. Em combinação com o cromo, o aço pode ser austenítico com teores de 18% Cr e 8% Ni. Quanto ao manganês, em média, para cada 1%, a resistência à tração aumenta 100 MPa. Para aços temperáveis, aumenta a dureza após o processo de têmpera.

TABELA 01 – Análise química das amostras.

Composição							
CP	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg
1	0,264	0,403	0,661	-	0,060	1,342	0,260
2	0,260	0,229	0,657	0,063	0,019	1,332	0,216
3	0,291	0,343	0,661	0,006	0,018	1,317	0,239
4	0,244	0,272	0,663	0,009	0,013	1,302	0,231
5	0,265	0,312	0,660	0,026	0,027	1,323	0,237

Fonte: Autor, 2012.

Cont. TABELA 01 – Análise química das amostras.

Composição								
CP	Ni	V	Al	Cu	Ti	Nb	Sn	N
1	3,262	-	-	-	-	-	-	-
2	2,896	0,005	0,048	0,170	0,004	0,003	0,010	0,002
3	3,249	0,005	0,043	0,122	0,002	0,003	0,007	-
4	3,350	0,004	0,235	0,129	0,001	0,003	0,007	0,004
5	3,189	0,005	0,109	0,140	0,002	0,003	0,008	0,003

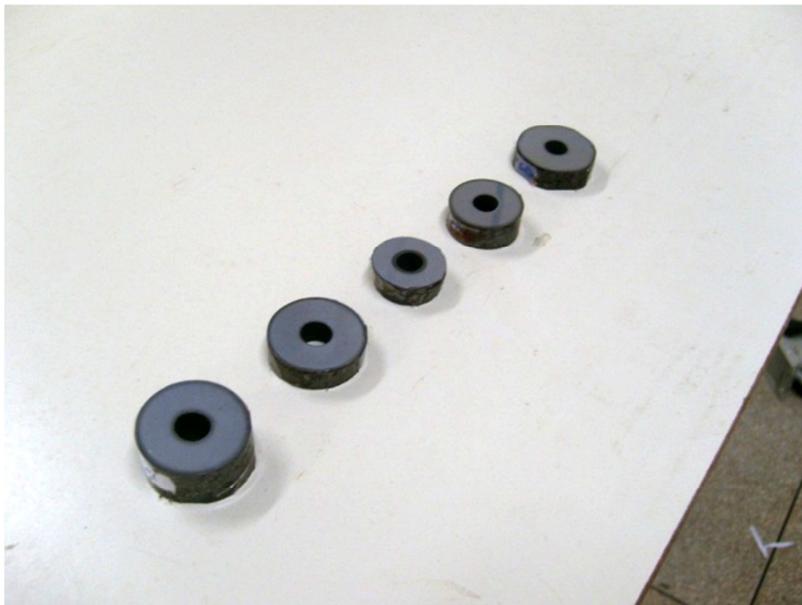
Fonte: Autor, 2012.

5.4. METALOGRAFIA

Nesta etapa teve-se a preparação das amostras para a análise metalográfica. Assim, seguiu-se: lixamento (com sequência de lixa 100, 220, 340, 400, 600, 800 e 1200), polimento (as amostras foram polidas utilizando uma sequência de pastas

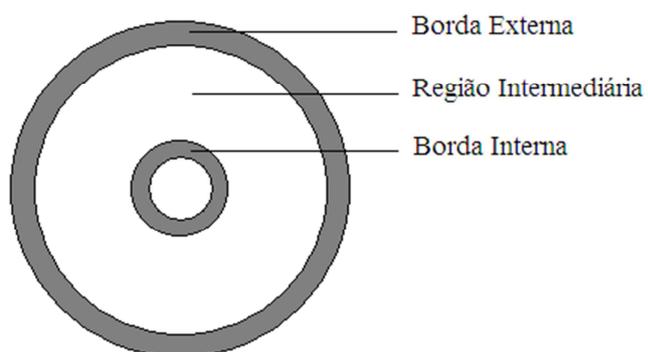
diamantadas de 9, 6, 3 e 1 micro) e ataque com Nital 2% ^[9,10] por 7 seg., Figura 13. Em seguida, as amostras foram levadas para a microscopia ótica, onde pode se observar microestruturas diferentes para as hastes, como mostra as Figuras de 15 a 19.

FIGURA 13 – corpo de prova com ataque nital 2%.



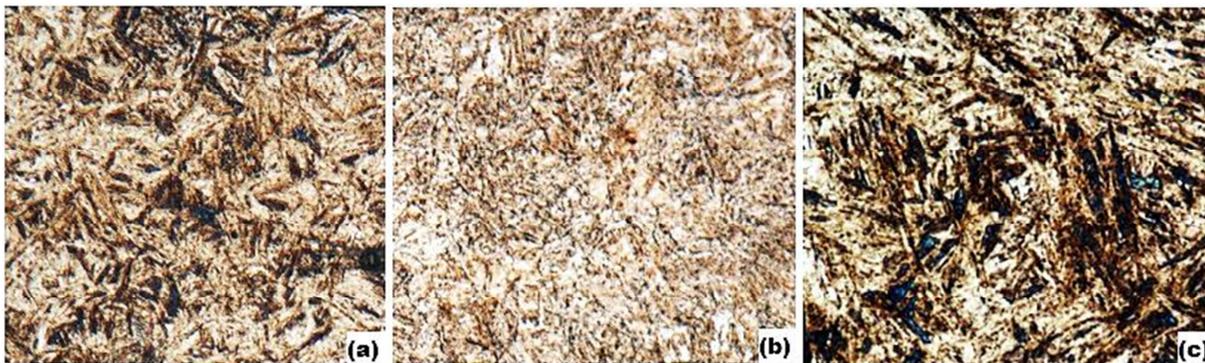
Fonte: Autor, 2012.

Figura 14 – Esboço da macrografia com camada cementada.



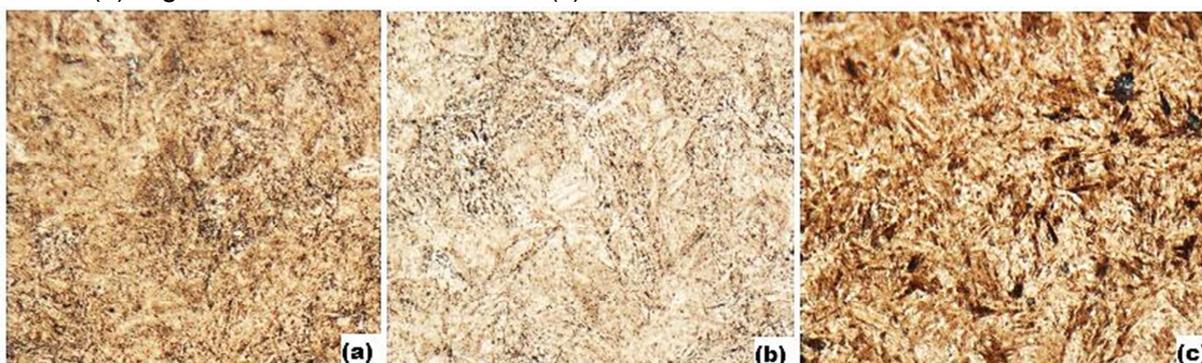
Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 15 – Melatografia CP1 Aumento 1000x (a) borda interna, martensita com austenita retida; (b) região intermediária, austenita; (c) borda externa, martensita com austenita retida.



Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 16 – Melatografia CP2 Aumento 1000x (a) borda interna, martensita com austenita retida; (b) região intermediária, austenita; (c) borda externa, martensita com austenita retida.



Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 17 – Melatografia CP3 Aumento 1000x (a) borda interna, martensita com austenita retida; (b) região intermediária, austenita; (c) borda externa, martensita com austenita retida.



Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 18 – Metalografia CP4 Aumento 1000x (a) borda interna, martensita; (b) região intermediária, austenita com perlita; (c) borda externa, martensita com austenita retida.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 19 – Metalografia CP5 Aumento 1000x (a) borda interna, martensita com austenita retida; (b) região intermediária, austenita; (c) borda externa, martensita.



Fonte: Autor, 2012.

A partir da análise foi possível identificar um padrão de microestrutura para os corpos de prova. Na borda interna e externa, devido o processo de cementação e têmpera, há formação de martensita, no entanto, a maioria das hastes apresenta martensita com austenita retida, ou seja, não transformada em martensita, e a quantidade de austenita retida aumenta na direção das superfícies, isso se deve a grande intensidade da transferência de calor. A região intermediária apresenta martensita com perlita fina, proveniente do processo de normalização.

No entanto, os tratamentos superficiais não foram eficientes para alguns corpos de provas. O CP4 não foi tratado termicamente na borda interna, Figura 18, e o CP5 não apresentou tratamento na borda externa, pois o mesmo teve a extremidade da haste usinada, Figura 19. No CP1 e no CP3 observou-se cementação e têmpera nas duas bordas, Figura 15 e 17, respectivamente, o CP2

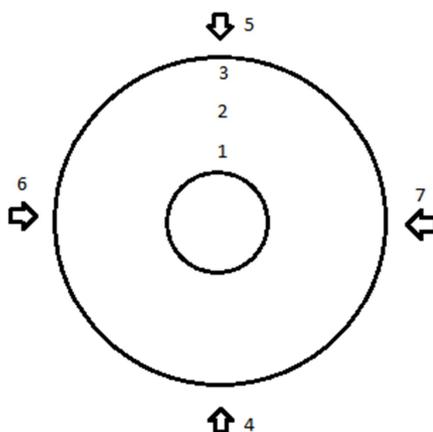
teve cementação e tempera nas bordas, no entanto, a borda interna apresentou uma camada de tratamento muito fina, cerca 0,5 mm, Figura 16.

Com base nos tratamentos térmicos e termoquímicos, as CP's foram divididas em quatro zonas de dureza, Figura 14, a primeira, refere-se à borda interna, a segunda a região intermediária da amostra com a dureza da matriz, a terceira a borda externa e a quarta a superfície externa da haste. A borda interna tem dureza média 345 HV, o meio da amostra, dureza média de 248 HV, na borda externa, dureza média de 294 HV, exceto para o CP5 que apresentou na borda interna, meio e externa, dureza média de 481, 354 e 534, respectivamente. Na superfície as CP's têm uma média de 632 HV, exceto para o CP4, que no ponto 4, tem dureza de 900 HV, Figura 21.

5.5. ENSAIO DE DUREZA

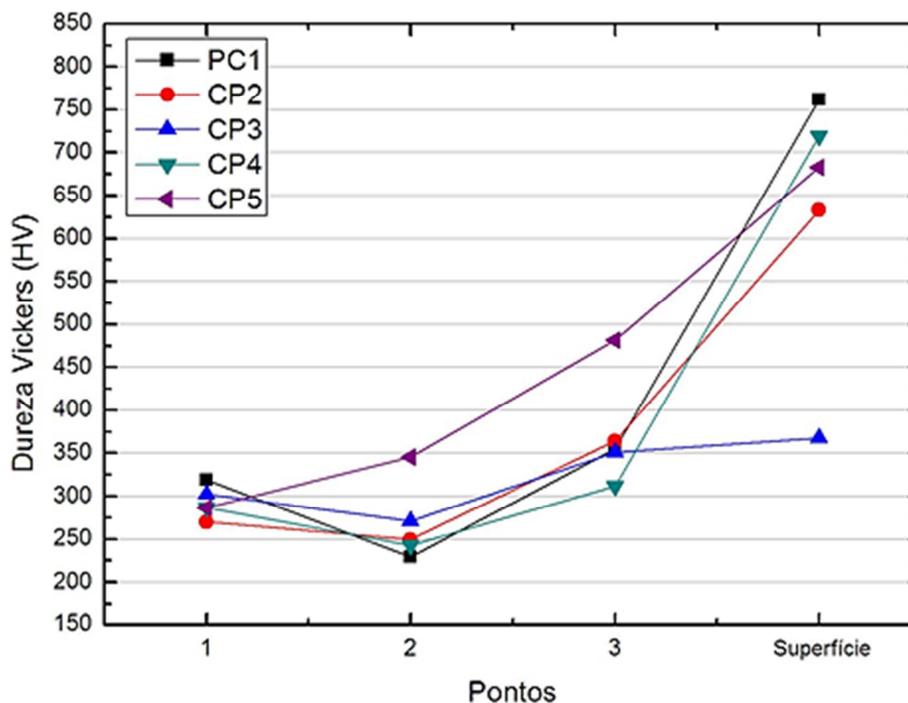
A microdureza Vickers^[11] foi realizada após a análise metalográfica a partidas das mesmas amostras. E seguindo o sistema de amostragem da Figura 20.

FIGURA 20 – Esquema de indentações para dureza.



Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 21 – Gráfico de Médias de Microdureza Vickers – HV.



Fonte: Autor, 2012.

As amostras apresentaram durezas parecidas, as camadas cementadas apresentaram dureza em torno de 357 HV, na matriz apresentaram dureza média de 267 HV, vale ressaltar que a amostra CP5 apresentou maior dureza, pois no ponto 1, 2 e 3 os valores foram de 481,5, 345,5 e 534 HV, respectivamente. Quanto à superfície externa apresentou dureza média de 632 HV.

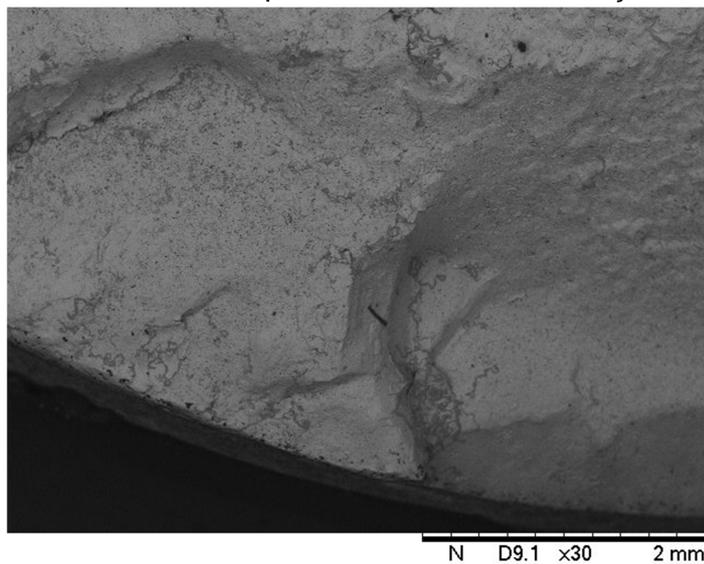
Grandes durezas não correspondem à grande resistência à fadiga, pois, um material muito duro é também um material frágil, as hastes têm grande dureza superficial e irregular, a exemplo o CP4. Elevada dureza dá ao material grande resistência à tração, no entanto, para torção e flexão, que são exemplo de solicitações nas quais as hastes estão submetidas, alta dureza é indesejável. Esses valores de durezas na superfície podem ser corrigidos com o tratamento térmico revenimento que além de reparar a fase martensita, alivia tensões internas provenientes do processo de fabricação^[3,4].

5.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Foi realizado MEV das superfícies de fratura onde se observou fratura frágil para todos os corpos de prova^[5].

O corpo de prova CP1, pode-se observar superfície levemente rugosa e em sua borda externa cementada e temperada, a formação de degraus ascendentes no sentido da rotação da haste. Além disso, podem-se observar inclusões na superfície da fratura.

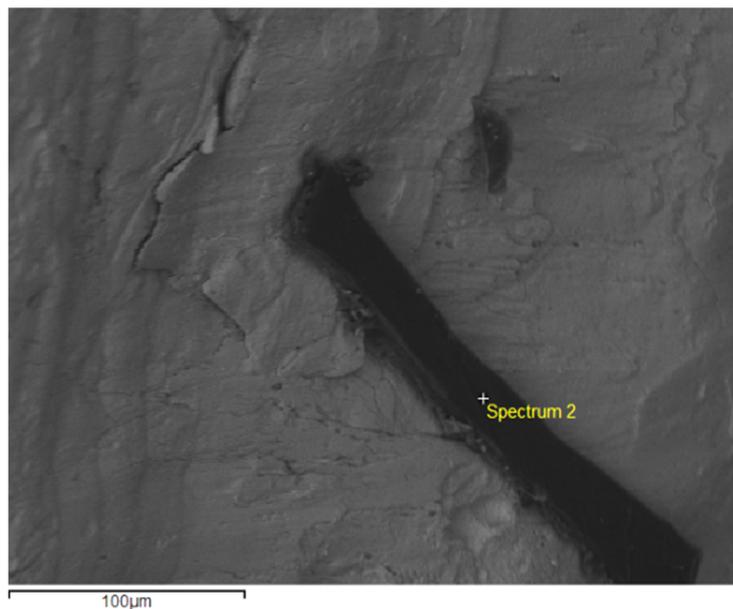
FIGURA 22 - Inclusão na superfície da fratura, e formação de degraus.



UFPA-FEMAT

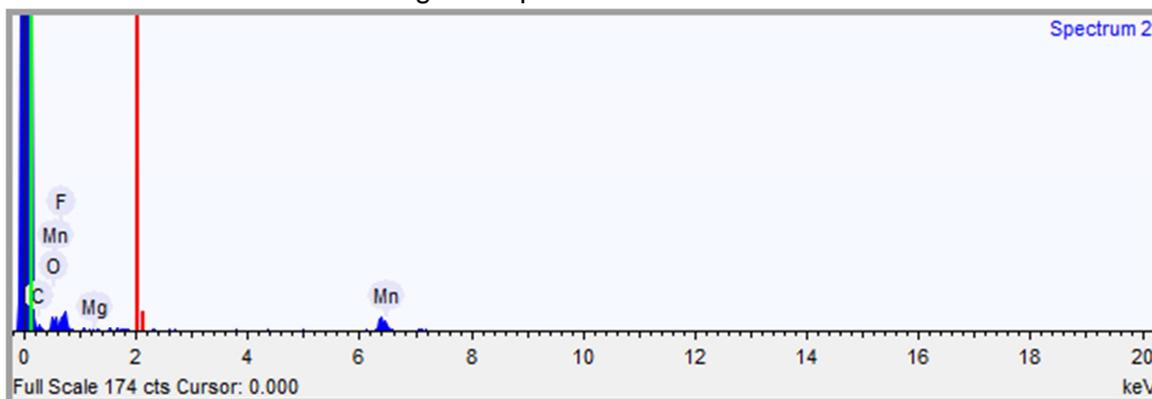
Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 23 - Detalhes da inclusão com microtrincas partindo de seus contornos. E o ponto onde foi realizado o EDS.



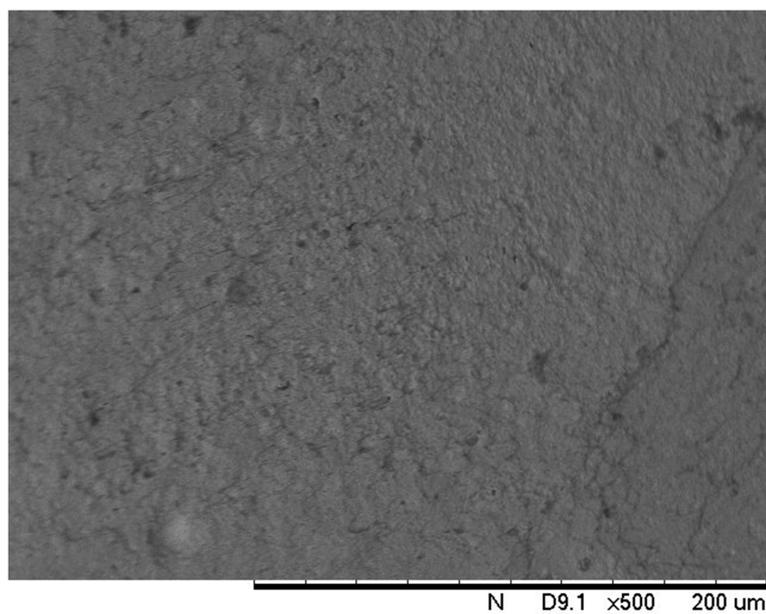
Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 24 - Gráfico spectrum mostra uma quantidade considerável de manganês aproximadamente de 0.149 %.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 25 - Detalhe da rugosidade da superfície.

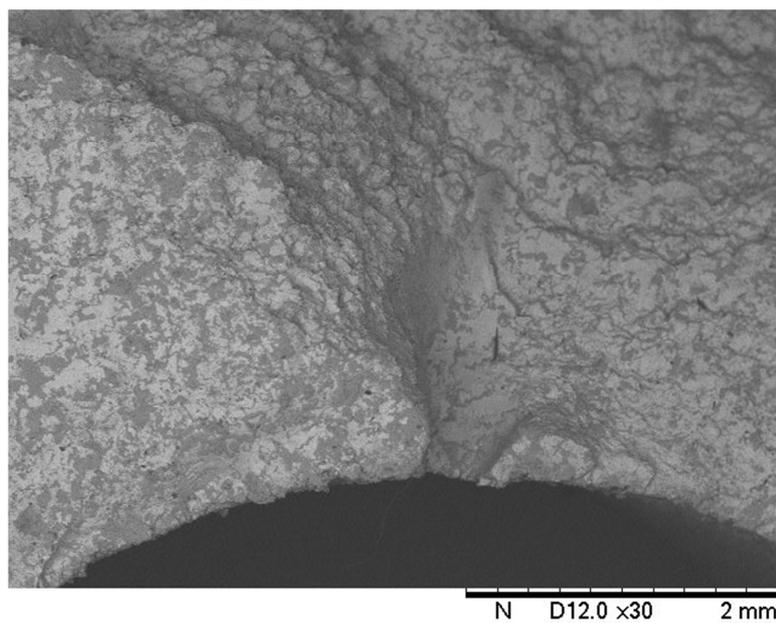


UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

O corpo de prova CP2, apresentou superfície com rugosidade mais grosseira, inclusões e microtrincas em suas superfícies.

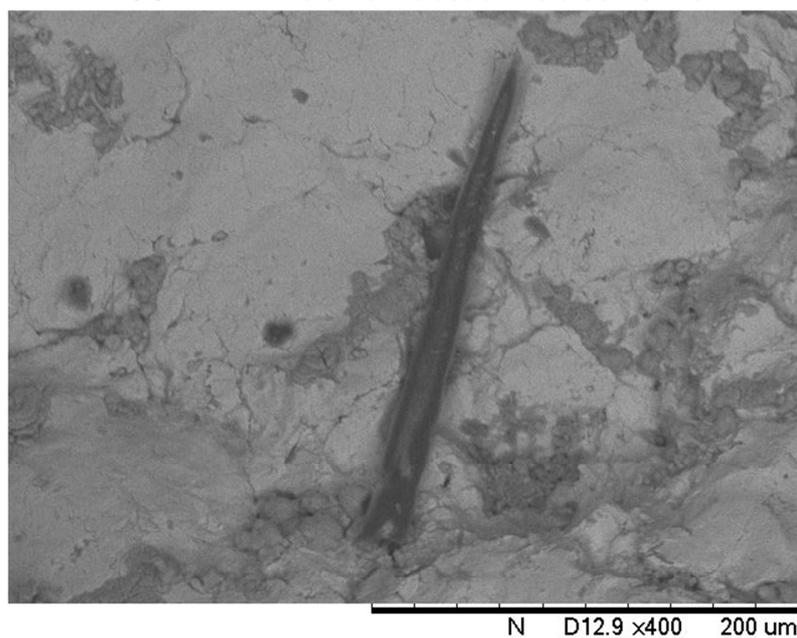
FIGURA 26 - Início da trinca com inclusão.



UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

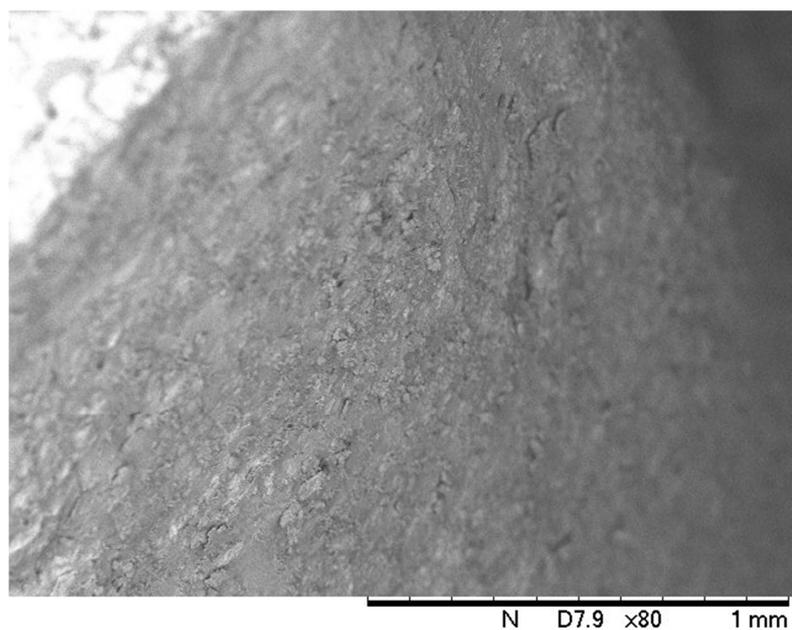
FIGURA 27 - Detalhe inclusão início da fratura.



UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 28–Rugosidade na superfície de fratura.

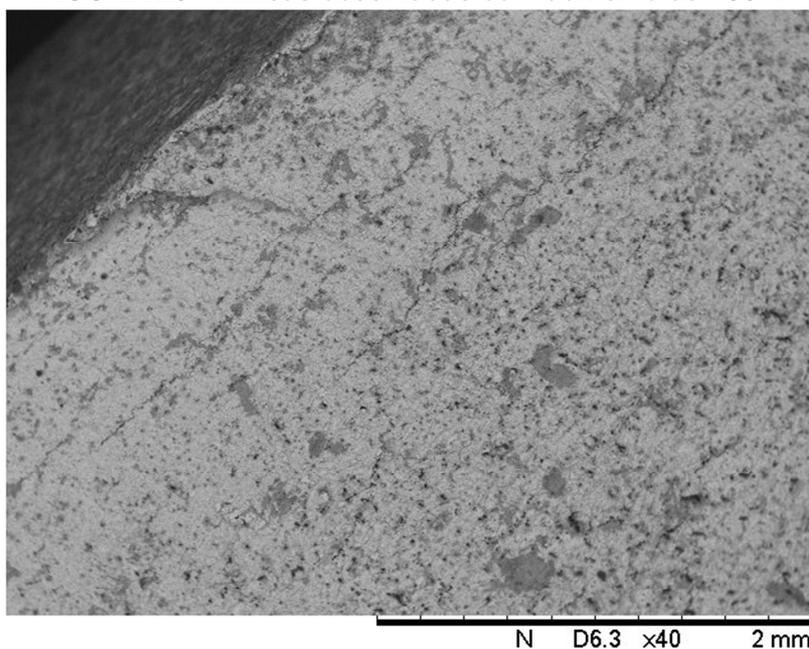


UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

O corpo de prova CP3 também apresentou inclusões e superfície característica de fratura frágil, no entanto, apresentou grande quantidade de trincas em sua superfície.

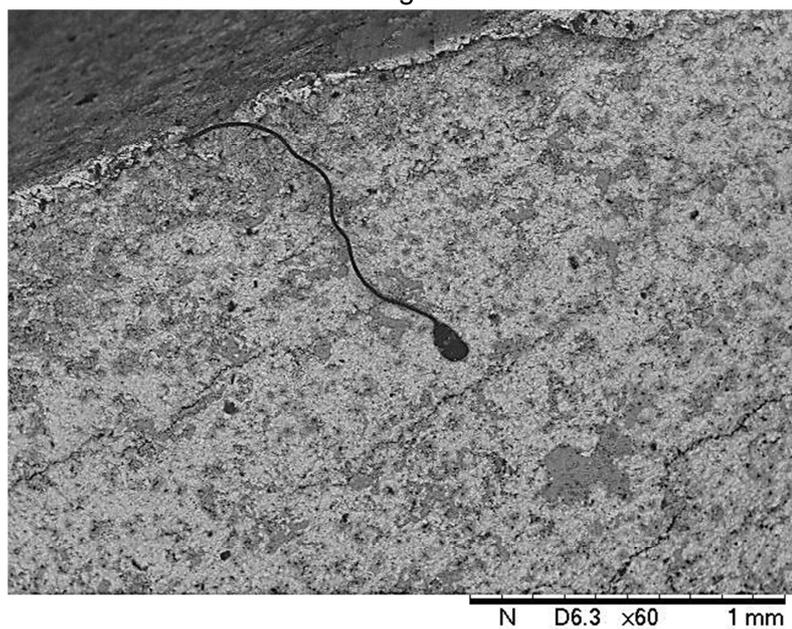
FIGURA 29 - Trincas observadas com aumento de 400 x.



UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

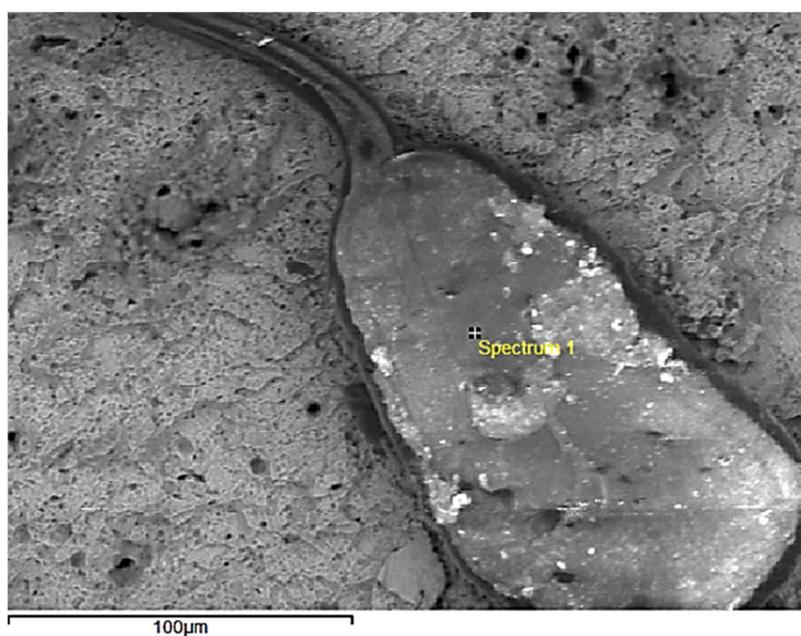
FIGURA 30 - Inclusão seguida de diversas trincas.



UFPA-FEMAT

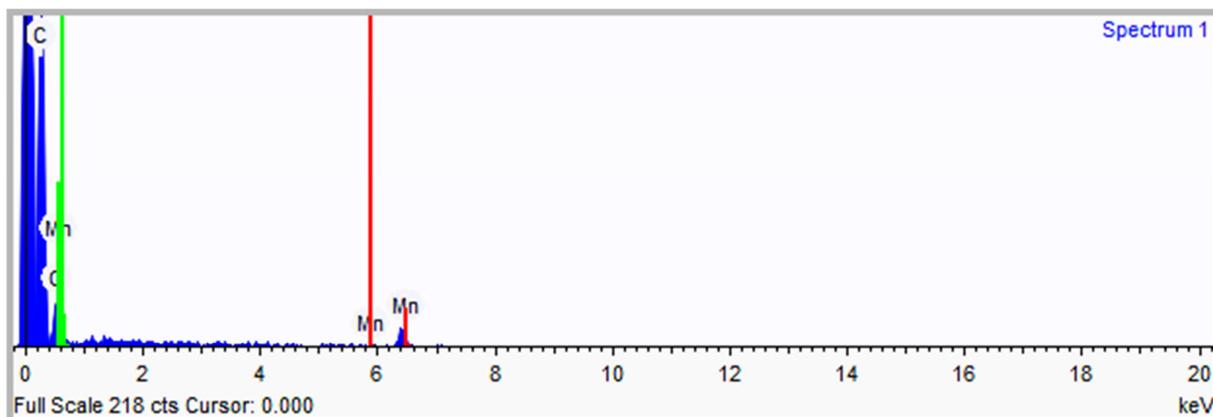
Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 31 - detalhes da inclusão na superfície fraturada com aumento de 1000 x e o ponto de realização do EDS



Fonte: Autor, 2012.

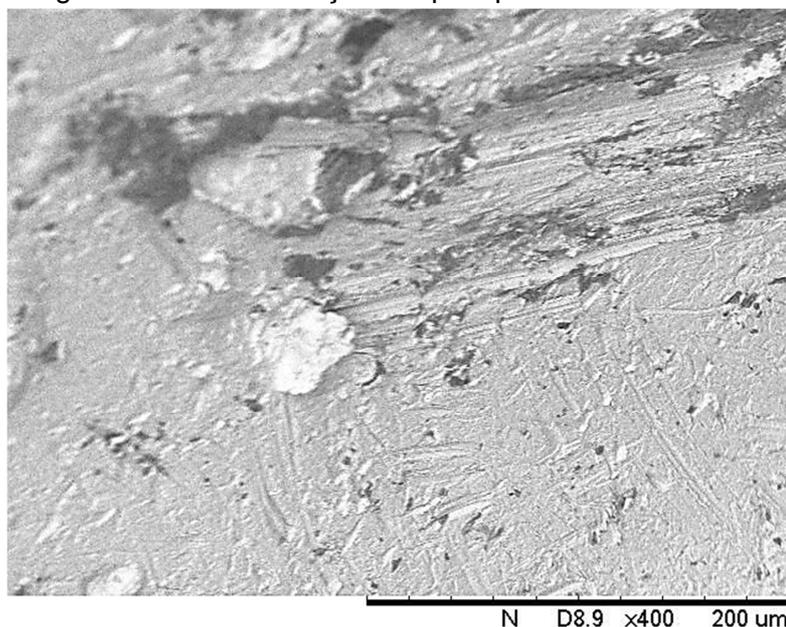
FIGURA 32 - Gráfico spectrum mostra grande quantidade Manganês na inclusão.



Fonte: Autor, 2012.

Quanto às amostras CP4 e CP5, não tiveram sua superfície de fratura totalmente preservada impossibilitando assim a análise superficial mais detalhada da fratura.

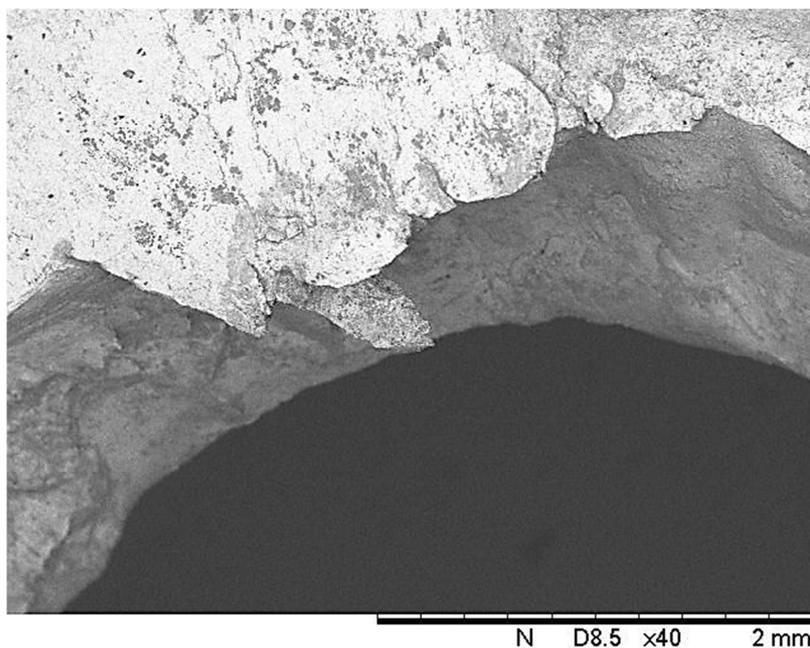
FIGURA 33 – superfície de falha danificada. É possível verificar a superfície lisa, ou seja, isenta de rugosidades e escamações o que aponta uma fratura do tipo frágil.



UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 34 – Superfície de falha CP5. Formação de rebarba na superfície de falha devido à haste permanecer em trabalho (rotação) após a fratura.

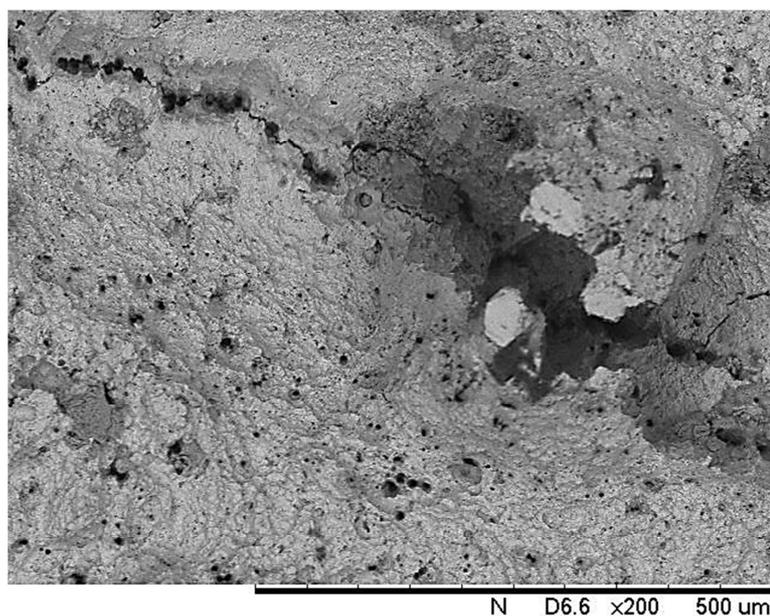


UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

Todos os corpos de provas apresentaram porosidades, no entanto, o CP3 se desta com grande quantidade de poros em toda superfície de fratura, Figura 33.

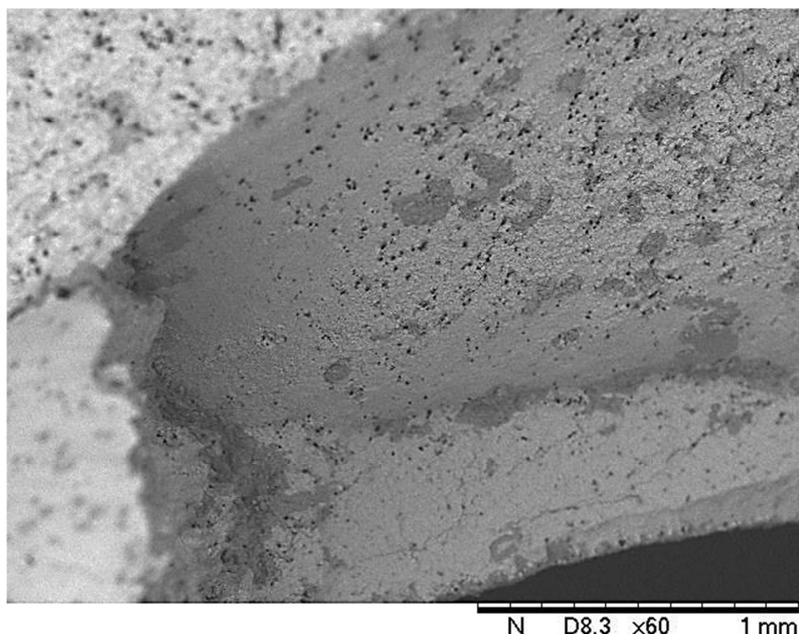
FIGURA 35 – Poros na superfície de falha do CP3.



UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

FIGURA 36 – Poros na superfície de falha do CP3.



UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2012.

Na análise visual verificou-se que três amostras, CP1, CP4 e CP5, não tiveram sua superfície de falha preservada, pois permaneceram em trabalho (em rotação) por um período além do considerado normal com relação à percepção da ocorrência da falha, pelo operador, desse modo, não foi possível verificar precisamente a superfície de falha por estereoscopia e MEV. Além disso, o CP5 teve sua extremidade usinada, a fim de reduzir sua seção transversal cônica.

As bordas externas e internas das amostras, segundo o catálogo do fabricante, foram cementadas numa espessura média de 1,5 mm, Figura 05, o que pode ser comprovado na metalografia. O objetivo da cementação é elevar a concentração de carbono nessas regiões e conseqüentemente a dureza. A cementação, ao longo de toda haste, e a têmpera superficial, nas pontas das hastes, implicam em maior dureza e resistência a falha por fadiga, pois as tensões externas são reduzidas em magnitude pela tensão residual de compressão que forma nas bordas endurecidas^[12].

Um dos principais tipos de falha em haste, devido às solicitações mecânicas na qual está submetida, é a fadiga. A resistência à fadiga aumenta numa aproximação proporcional a resistência à tração^[13], porém, valores muito elevados de dureza, a resistência à fadiga não é beneficiada. A explicação se dá pelo grande probabilidade de formação de inclusões em aços de alta resistência, vale lembrar

que nos corpos de prova foram identificadas diversas inclusões, próximas às zonas de maior dureza, Figuras 23, 27, 30 e 31. As inclusões atuam nos materiais como micro-trincas gerando pontos de concentração de tensão onde nucleiam falhas por fadiga.

Quanto à análise fractográfica, no CP1, verificou-se certa rugosidade na transição da zona cementada externa com o meio e início da formação de dimple, que é característico de materiais dúcteis. Na zona cementada, a superfície se manteve lisa e com mudanças no plano de fratura, característica de materiais frágeis. Foi possível verificar a presença de inclusão, nesta região, que é mostrada com mais detalhes na Figura 22 e 23, onde se podem observar trincas partindo da inclusão. O CP2 tem superfície de falha rugosa com presença de inclusão e micro trincas, também houve mudança de plano de fratura na região da inclusão, Figura 26 e 27. No CP3, há grande quantidade de trincas e poros na superfície de fratura, além de inclusão, Figura 30. O CP4 e o CP5 destacam-se pela grande quantidade de poros ao longo de toda sua superfície de falha. Os CP's 01, 04 e 05, não tiveram sua superfície de falha preservada, assim não foi possível uma verificação precisa.

De modo geral, os corpos de prova apresentam grande quantidade de defeitos e pouca evidência, por exemplo, de marcas de praia, dimple, que caracterizam e possibilitam identificar o tipo de falha. Isso se deve ao fato de defeitos como trincas, poros e inclusões, dependendo do seu tamanho em relação à peça, atuarem como discordâncias nas superfícies de fratura de modo à desconfigurá-las^[5,14].

Analisando a falha do CP3 pode se observar que a fratura teve início na borda interna, onde há a união de três ramificações de trinca, ou seja, um ponto de grande concentração de tensão, ver Figura 36. A intensidade de tensão no extremo de uma trinca não pode ultrapassar o valor crítico de tenacidade à fratura, caso contrário ocorrerá propagação da trinca. Neste caso, o ponto de união das três trincas é o local, na superfície de fratura, com maior concentração de tensão. A partir deste ponto a trinca se propaga em duas direções uma perpendicularmente à seção transversal da haste e a outra com ângulo de 45 graus. Devido à grande quantidade de trincas e poros presentes na superfície de falha perpendicular a seção transversal, poros com tamanhos de aproximadamente 300 μm e inclusões com tamanho de aproximadamente 200 μm , pode se afirmar que houve um alto grau de

deslizamento nas superfícies de trincas e contornos de inclusões durante a rotação da haste, isso explica a propagação transgranular da trinca, ver Figura 30 e 31.

FIGURA 37 – Início da fratura CP3



Fonte: Autor, 2012.

O CP3 apresentou menor média de dureza aproximadamente 323 HV, ou seja, uma dureza intermediária entre materiais frágeis e materiais dúcteis. Não houve grande aumento progressivo de dureza em direção à região externa da haste, pois o mesmo apresentou a menor dureza na região externa. No entanto, a microestrutura martensítica é frágil e não houve revenimento para correção da austenita retida e nem alívio das tensões, isso explica as trincas presente próximo a região externa, ver Figura 29 e 30. A Falha no CP3 iniciou-se na região central, ver Figura 32, propagou-se perpendicularmente ao eixo longitudinal da haste, em seguida, se rompeu por torção. O ângulo de 45 graus é característica de materiais frágeis em fratura por torção.

6. CONCLUSÃO

A rotação da haste gera tensões cisalhantes nas extremidades das trincas e as vibrações mecânicas provenientes do atrito haste-rocha produzem intensidade de carregamentos variáveis, ou seja, carregamentos cíclicos. Na fadiga de baixo ciclo a nucleação e a propagação da trinca ocorrem acompanhadas por um escoamento generalizado na superfície da peça, resultando em geral numa superfície rugosa,

pelo elevado grau de deformação plástica^[17], o que pode ser observado em todos os CP's, ver Figura 25, 26 e 28. Dependendo do material e do modo como ocorrem os planos de deslizamento, as microtrincas podem ser nucleadas a partir das bandas de deslizamento, ou mesmo a partir dos contornos de grão, quando o corrugamento superficial for excessivo. Neste caso formam-se degraus na superfície, observado no CP2, ver Figura 26, devido a um escorregamento intergranular, ao longo dos contornos de grão, sendo as microtrincas intergranulares logo na sua formação, podendo passar a transgranular com o crescimento^[17].

Os corpos de prova 1 e 2, apresentam características de falha por fadiga de baixo ciclo, com propagação em degraus intergranular e marcas de praia, ver Figuras 22, 23 e 25. O corpo de prova 3 falhou por torção. Nos corpos de prova 4 e 5 não foram encontrados indícios suficientes para justificar o tipo de falha, pois suas superfícies estavam bastante desconfiguradas.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que o processo e/ou técnicas empregadas na fabricação das hastes não proporciona boa qualidade e eficiência ao produto. Os defeitos encontrados nos corpos de prova reduzem consideravelmente a vida útil do material, pois as trincas, poros, inclusões, dureza excessiva e não regularidades das propriedades afetam diretamente a resistência do material às solicitações no qual será submetido.

REFERÊNCIAS

- [01] Global Product Catalogue - www.boartlongyear.com;
- [02] BRESCIANI, E. F. **Conformação Plástica dos Metais**. 4ª Edição. Campinas.
- [03] PEREIRA, M. **Tratamentos Térmicos e Termoquímicos**. Departamento de Engenharia de Materiais. PUC. RIO;
- [04] PINTO, L. G. S. **Tratamento Térmico**. SENAI-SP, 2003;
- [05] Handbook of Metals Volume 12 of the 9th Edition – **Fractography**;
- [06] ASTM E3 - 95– **Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens**;
- [07] SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços**;
- [08] COSTA, A. L.; Mei, S. P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª Edição;
- [09] Handbook of Metals Volume 9 of the 9th Edition. **Metallography and Microstructures**;
- [10] COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª Edição;
- [11] ASTM E384 – 99 - **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**;
- [12] GARCIA, Amauri. **Ensaio dos Materiais**;
- [13] SCHIJVE, Jaap. **Fadigue de Structures e Materials**. Delft University Technology Faculty Aerospace Engineering, The Netherlands;
- [14] MURAKAMI, Y. Metal Fatigue: **Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions**. 2002;
- [15] JONES, D.R.H. **Failure Analysis Case Studies II**. Department of Engineering University of Cambridge, UK – 2001;
- [16] MOBLEY, R. K. **Root Cause Failure Analysis**;
- [17] ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica**. Departamento de Engenharia Mecânica. UFSC. 2002