

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES E DIMENSÕES DA ZONA DE FLUXO NA USINAGEM DE METAIS

RODRIGO DE AZAMBUJA MONTANDON RIBEIRO¹

RICARDO AUGUSTO GONÇALVES²

ÁLISSE ROCHA MACHADO³

Resumo: Em usinagem, as condições em que ocorre a formação do cavaco influenciam diretamente a força de usinagem, o calor gerado, a temperatura de corte, a taxa de desgaste das ferramentas de corte e conseqüentemente a vida das ferramentas. Portanto, entender a formação do cavaco é de extrema importância para se ter o domínio do processo de corte. Estudar a interface cavaco-ferramenta, entretanto, tem sido um desafio muito grande, porque são poucas as conclusões que podem ser tiradas de observações diretas durante o corte. As maiores dificuldades são provocadas pelas velocidades de saída dos cavacos, normalmente, muito elevadas e pelas reduzidas áreas de contato cavaco-ferramenta envolvidas. Sabe-se que na usinagem dos metais uma zona de intensa deformação plástica, denominada Zona de Fluxo, se apresenta na interface cavaco-ferramenta. Este trabalho surgiu da necessidade de se obter mais informações sobre esta zona de fluxo. O que se conhece desta zona em quase sua totalidade são hipóteses teóricas, com poucos trabalhos experimentais sobre o assunto. Nessa investigação, a morfologia da zona de fluxo e a microdureza desta região, em diversas condições de corte, são estudadas. Para tanto, foram usadas a técnica de quick-stop no torneamento e micrografias da raiz do cavaco, e de segmentos distintos de cavacos, de três materiais: aço inoxidável austenítico ABNT 304, Aço ABNT 1050 e alumínio comercial. A influência da velocidade de corte e do avanço é investigada. Os testes e análises experimentais foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia.

¹ Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.. Av. João Naves de Ávila, 2121, Bairro Santa Mônica, Uberlândia - MG, CEP 38400-902. rodrigoazambuja.net@hotmail.com

² Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.. Av. João Naves de Ávila, 2121, Bairro Santa Mônica, Uberlândia - MG, CEP 38400-902. ricardo_eng_mec@hotmail.com

³ Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.. Av. João Naves de Ávila, 2121, Bairro Santa Mônica, Uberlândia - MG, CEP 38400-902. alissonm@mecanica.ufu.br

PALAVRAS CHAVE: zona de fluxo; quick-stop; interface cavaco-ferramenta; microdureza; torneamento.

Abstract: In machining, the condition under which the formation of the chip occurs directly influences the machining forces, the heat generation, the temperature of cutting, the mechanisms and the rate of wear of the cutting tools; and hence the tool life. Thus, understanding the formation of the chip is extremely important in order to have control of the cutting process. However, studying the chip-tool interface has been a big challenge as there are few conclusions that can be drawn from direct observation during cutting. The greatest difficulties are caused by the high speeds of the chips, which occur in extremely small areas of the chip-tool interface. It is known that during the machining of metals a zone of intense plastic deformation, known as the 'flow zone', is present in the chip-tool interface. This work arose from the need to obtain more information about this flow zone. What is known about this area are almost entirely theoretical assumptions, with a few experimental studies on the subject. In this investigation the morphology of the flow zone and microhardness of this region in various cutting conditions are studied. This study is carried out using the quick-stop technique in turning and micrographs of the chip roots and of other separate segments of the chips. The segments of the chips are made from three different materials: austenitic stainless steel ABNT 304, ABNT 1050 and Aluminum. The influence of the cutting speed and the feed rate were investigated. The tests and experimental analysis were carried out at the Machining Teaching and Research Laboratory (LEPU) of Federal University of Uberlândia.

KEYWORDS: flow zone, quick-stop, chip-tool interface, microhardness, turning.

1. INTRODUÇÃO

A Usinagem pode ser definida de uma forma simples como: “Processo de fabricação com remoção de cavaco”. Na realidade, ao consultar a bibliografia, diferentes definições de usinagem serão encontradas. Uma bastante abrangente é a seguinte: “Operação que ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produz cavaco”(FERRARESI, 1970). E por cavaco entende-se: “Porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular”(FERRARESI, 1970).

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo o mundo.

Apesar desta popularidade, trata-se, ainda, de um processo bastante imprevisível e a definição paradoxal que se segue relata com precisão toda a sistemática que envolve o mesmo: “É um processo, complexo e simples ao mesmo tempo, onde se produzem peças, removendo-se excesso de material, na forma de cavacos”. É “complexo” devido às dificuldades em se determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. É “simples” porque, uma vez determinadas as condições ideais de corte, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de ação especial do operador. As condições ideais de corte consistem de: (1) material e geometria adequados da ferramenta de corte; (2) velocidade de corte e avanço adequados para uma profundidade de corte pré-determinada; (3) fluído de corte adequado; tudo isto para ser usado em uma máquina-ferramenta pré-escolhida, para usinar um determinado material. Estas condições ideais de corte são aquelas capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível (MACHADO; Da SILVA, 2009).

Usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, envolvendo um número de variável bastante grande. Shaw resume o problema da seguinte maneira. “é praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais. Entretanto, isto não quer dizer que estudos detalhados dos processos de usinagem não têm valor. Cada ponto fundamental que é detalhadamente estudado e propriamente interpretado contribui para o entendimento do processo, e entendimento é o passo mais próximo da capacidade de prever” (MACHADO; Da SILVA, 2009).

Este trabalho se propõe investigar o comportamento da zona de fluxo, no torneamento de materiais metálicos e verificar a influência das condições de corte (velocidade de corte e avanço) e do tipo de material (Aço ABNT 1050, Aço Inoxidável 304 e Alumínio comercial) nas características desta zona. As condições da zona de fluxo do cavaco serão determinadas a partir da análise de micrografias do cavaco, com medição das suas dimensões de microdureza.

2. METODOLOGIA

A investigação da zona de fluxo foi realizada em duas etapas: a primeira etapa utilizando o dispositivo quick-stop para analisar a raiz do cavaco; e a segunda etapa coletando cavacos de um processo de torneamento convencional, pois se espera que a zona de fluxo esteja presente em toda a extensão do cavaco. Sendo possível confirmar a presença da zona de fluxo em todo o cavaco, comparando suas condições com as da raiz do cavaco.

2.1 Primeira Etapa

O dispositivo quick-stop tem como principal função realizar uma brusca parada no processo de torneamento. É aplicado o golpe no pino localizado na parte superior, que obriga a ferramenta a girar em um eixo a ela acoplado, deixando a zona de corte imediatamente, fazendo com que o cavaco continue aderido à peça usinada. O dispositivo pode ser visualizado a partir da Fig 3.1



Figura 2.1 – Dispositivo Quick Stop

No processo de usinagem, em todos os testes, foram usados a ferramenta SPMN 120308, revestida de metal duro, com o suporte CSBPR 2525 H12. De acordo que a mesma ia desgastando, era feito uma troca, por uma pastilha nova, pois sabe-se que ferramentas desgastadas, influenciam muito em varios fatores de usinagem. Os pinos fusíveis foram produzidos em Aço 1045 temperados a 900°C e revenidos a 350°C para conferi-los dureza e resistência. Foi utilizado o forno JUNG modelo 2513, para a realização das têmperas.

Para aperfeiçoar o processo entre os ensaios, foram desenvolvidos anéis do material a ser usinado e um novo dispositivo de fixação dos mesmos. O anel era acoplado ao dispositivo de fixação e após a usinagem apenas ele era retirado facilitando a retirada do cavaco e liberando a máquina para realizar um novo ensaio. Na Fig. 2.2 tem-se o dispositivo de fixação e o corpo de prova em forma de anel.

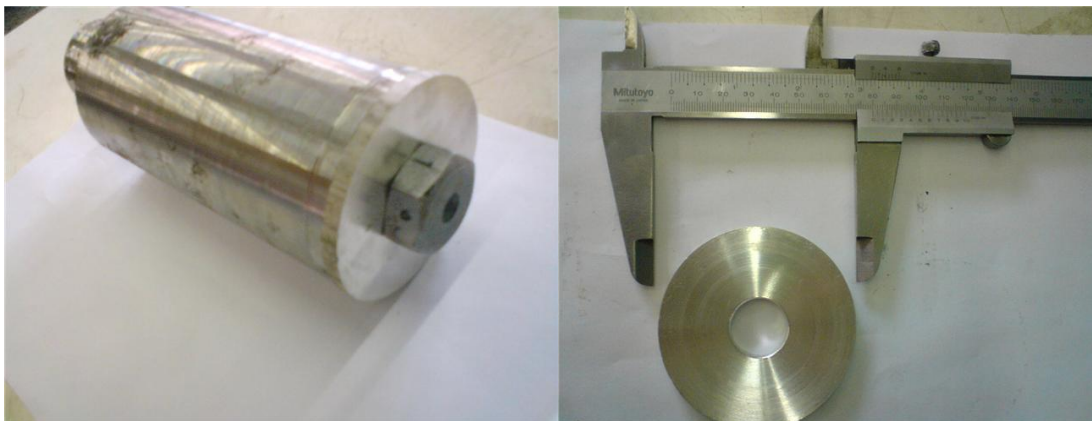


Figura 2.2 - Dispositivo de Fixação dos anéis (170 mm de comprimento e 80 mm de diâmetro) e os respectivos corpos de prova em forma de anel

Nesta primeira etapa foram usinados dois materiais: Alumínio comercial e Aço 1050. A usinagem foi feita no torno IMOR Maxi-II – 520 da oficina mecânica da UFU, realizando os testes com as condições de corte segundo a Tab. 2.1:

Tabela 2.1 - Condições de corte: Primeira Etapa

Amostra	Material	Teste	d (mm)	n(RPM)	vc(m/min)	f(mm/rot)	ap(mm)
RCAL1	Alumínio	1	51	280	44,84	0,138	1,5
RCAL2	Alumínio	2	76,5	280	67,26	0,138	1,5
RCAL3	Alumínio	3	62	450	87,6	0,138	1,5
RCAL4	Alumínio	4	76,5	450	108	0,138	1,5
RCA1	Aço	1	53,4	355	59,5	0,138	1,5
RCA2	Aço	2	53	450	74,89	0,138	1,5
RCA3	Aço	3	53,5	560	94,07	0,138	1,5
RCA4	Aço	4	53,3	710	118,83	0,138	1,5

Após a usinagem eram retirados os anéis e levados até a morsa para que fosse serrada a parte que contém o cavaco. Para a análise da raiz dos cavacos foram criadas amostras com resina cristal de polietileno, facilitando o manuseio dos cavacos, e evitando possível falha do cavaco com pressões de embutimento convencional

Para ser feita uma investigação das microestruturas e propriedades físicas da zona de fluxo, é necessário fazer uma análise micrográfica, que consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar e identificar a granulação do material, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

Depois de feito o lixamento, o polimento e em seguida o ataque químico, as amostras estão prontas para serem analisadas no microscópio metalúrgico. Foram feitas imagens das amostras de cavaco no Microscópio Metalúrgico Risitec do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - LEPU da Universidade Federal Uberlândia, e coletados valores de microdureza ao longo da espessura do cavaco a partir da interface cavaco-ferramenta utilizando o microdurômetro Digital MicroHardness Tester HSV-1000, do Laboratório de Metalografia da Fabricação, utilizando a carga de 0,245 g, na Fig. 2.2 temos os equipamentos ilustrados.



Figura 2.3 – Microscópio Metalúrgico e Microdurometro usado nas análises.

2.2 Segunda Etapa

Na segunda etapa foram coletados cavacos de um torneamento convencional utilizando três materiais distintos: Alumínio comercial, Aço 1050 e Aço Inoxidável

ABNT 304. Os cavacos foram produzidos utilizando o torno IMOR Maxi-II – 520 da oficina mecânica da UFU. As condições de corte utilizadas estão na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Condições de corte: Segunda Etapa

Amostra	Material	Teste	d(mm)	n(RPM)	vc(m/min)	f(mm/rot)	ap(mm)
AL1	Alumínio	1	58	450	81,954	0,169	2
AL2	Alumínio	2	58	560	101,9872	0,169	2
AL3	Alumínio	3	58	710	129,3052	0,169	2
AL4	Alumínio	4	58	900	163,908	0,169	2
AL5	Alumínio	5	58	1400	254,968	0,169	2
AL6	Alumínio	6	58	560	101,9872	0,138	2
AL7	Alumínio	7	58	560	101,9872	0,242	2
AL8	Alumínio	8	58	560	101,9872	0,337	2
AL9	Alumínio	9	58	560	101,9872	0,431	2
AL10	Alumínio	10	58	560	101,9872	0,554	2
A1	Aço 1050	1	52	450	73,476	0,169	2
A2	Aço 1050	2	52	560	91,4368	0,169	2
A3	Aço 1050	3	52	710	115,9288	0,169	2
A4	Aço 1050	4	52	900	146,952	0,169	2
A5	Aço 1050	5	52	1400	228,592	0,169	2
A6	Aço 1050	6	52	560	91,4368	0,138	2
A7	Aço 1050	7	52	560	91,4368	0,242	2
A8	Aço 1050	8	52	560	91,4368	0,337	2
A9	Aço 1050	9	52	560	91,4368	0,431	2
A10	Aço 1050	10	52	560	91,4368	0,554	2
I1	Inox	1	74	450	104,562	0,169	2
I2	Inox	2	74	560	130,1216	0,169	2
I3	Inox	3	74	710	164,9756	0,169	2
I4	Inox	4	74	900	209,124	0,169	2
I5	Inox	5	74	1400	325,304	0,169	2
I6	Inox	6	74	560	130,1216	0,138	2
I7	Inox	7	74	560	130,1216	0,242	2
I8	Inox	8	74	560	130,1216	0,337	2
I9	Inox	9	74	560	130,1216	0,431	2
I10	Inox	10	74	560	130,1216	0,554	2

Após a usinagem, parte do cavaco de cada teste era coletado, armazenado e embutido em baquelite, utilizando a embutidora TERMOPRESS 2 - STRUERS do laboratório de Tribologia e Materiais da UFU, mostrada na Fig. 2.4.



Figura 2.4 - Embutidora TERMOPRESS 2 – STRUERS

As amostras foram lixadas, polidas, atacadas e foram feitas fotos e coleta de microdureza assim como nas amostras de raiz de cavaco da primeira etapa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Dureza

3.1.1 Aço ABNT 1050

1º Análise : As medições de microdureza foram realizadas em uma linha vertical seguindo uma mesma proporção com relação à espessura do cavaco, tanto nas amostras da raiz quanto nos demais cavacos para a investigação da variação da microdureza a partir da zona de fluxo conforme as Fig. 3.1

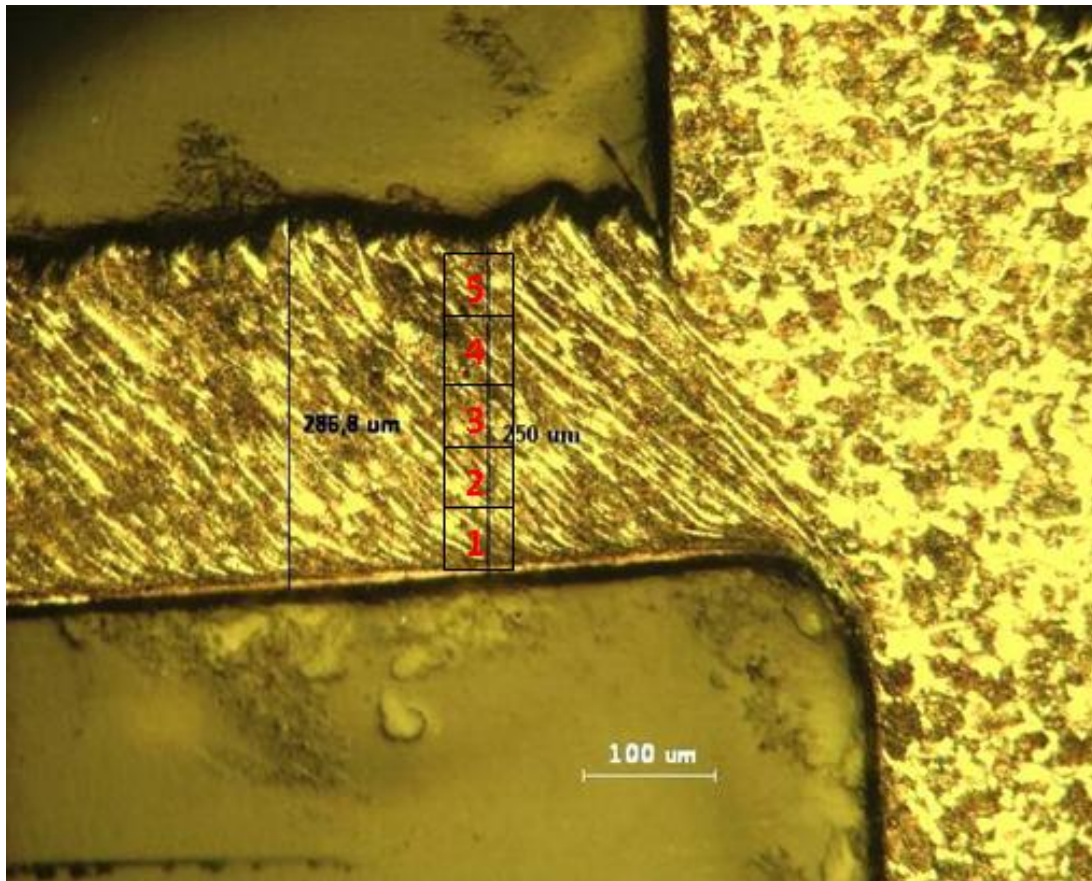


Figura 3.1 - Esquema de medições de microdureza ao longo da espessura na raiz do cavaco de aço ABNT 1050

Os resultados encontrados nos ensaios de microdureza realizados nas amostras de aço ABNT 1050 estão listados na tabela 3.1. É possível perceber que os maiores valores encontrados estão presentes nas medições realizadas no ponto um, que compreende a parte mais inferior da espessura do cavaco, próxima à zona de fluxo. Isso se deve ao fato de que nessa região existe grande deformação plástica acarretando no encruamento do material. Algumas amostras como RCA2 E A2 apresentaram altos índices de microdureza, 614 e 494 HV, evidenciando que nestes ensaios o penetrador do microdurômetro deve ter feito a medida exatamente sobre a zona de fluxo, porção mais deformada e conseqüentemente mais dura do cavaco.

Tabela 3.1 - Microdureza ao longo da espessura de amostras cavaco de aço 1050

Amostra	Microdureza HV				
	Pontos				
	1	2	3	4	5
RCA1	354	325	273	282	304
RCA2	614	341	332	322	282
RCA3	285	319	233	358	362
RCA4	351	300	329	352	339
A1	488	251	311	292	251
A2	494	354	301	364	287
A3	444	397	322	121	117
A4	256	262	210	195	226
A5	292	294	199	230	295
A6	375	267	306	295	366
A7	388	253	306	324	304
A8	320	319	282	264	268
A9	408	237	252	245	270
A10	485	254	298	325	291

A partir da Tab. 3.1 foram feitos gráficos levando em conta as condições de corte utilizadas em cada amostra para melhor ilustrar a variação da microdureza ao longo dos cavacos de aço ABNT 1050.

As Fig. 3.2 e Fig 3.3 apresentam a variação da microdureza em relação à velocidade de corte e avanço de corte respectivamente. No gráfico que mostra a variação da velocidade de corte é possível observar uma tendência de diminuição da microdureza à medida que a penetração se afasta da zona de fluxo. Observa-se ainda que a microdureza do ponto 1, mais próximo à zona de fluxo, tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. Quando se variou o avanço, a microdureza do ponto 1 tende a ser diretamente proporcional ao valor desta variável.

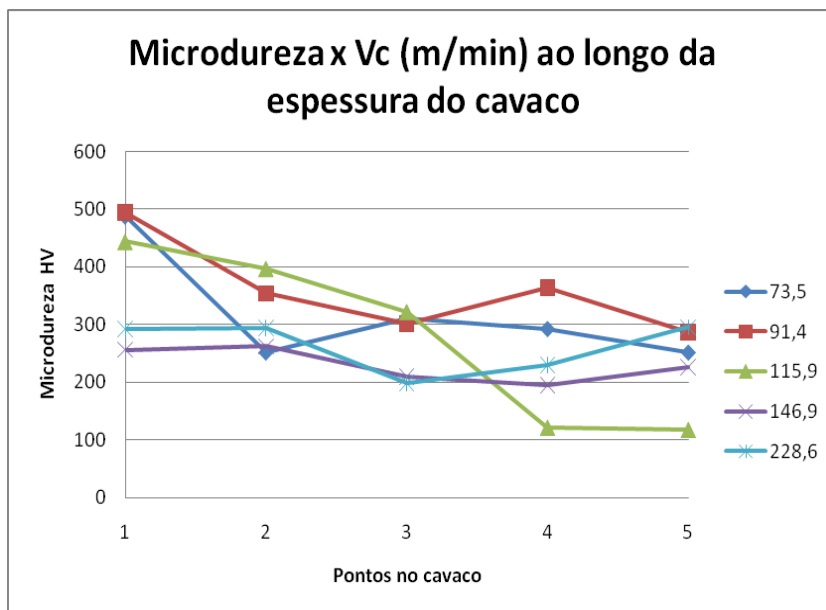


Figura 3.2 - Microdureza x Vc (m/min) ao longo da espessura do cavaco de aço 1050

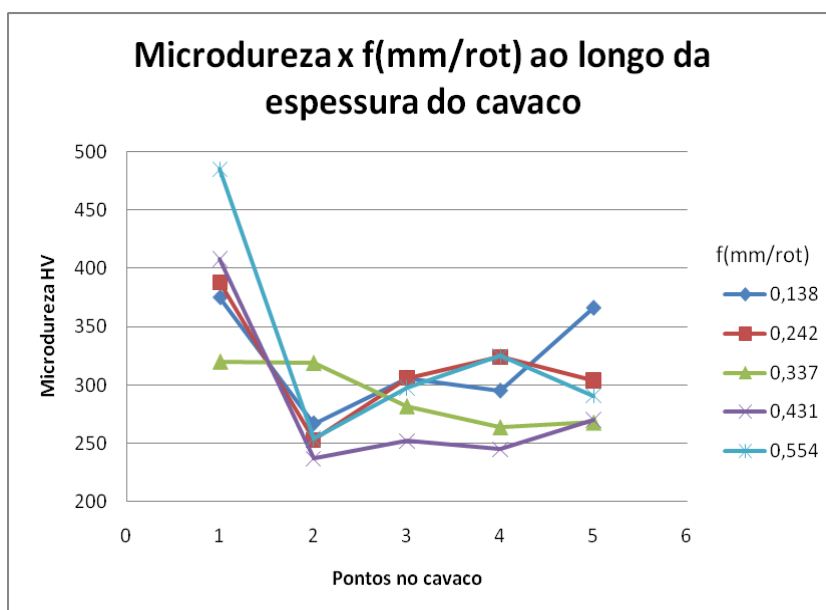


Figura 3.3 - Microdureza x f(mm/rot) ao longo da espessura do cavaco de aço 1050

2º Análise : A fim de comparar os resultados encontrados nos cavacos, foram feitas algumas medições de microdureza no material em locais onde não houve deformação plástica. Na Fig. 3.4 temos o esquema utilizado para a medição das microdurezas, e em seguida, temos na Tab. 3.2 os valores medidos das microdurezas das amostras de Aço ABNT 1050.

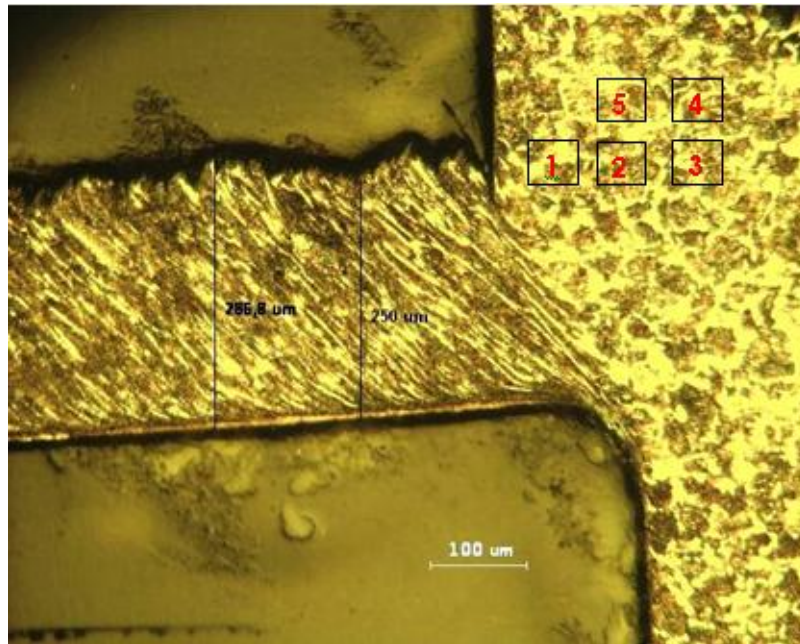


Figura 3.4 - Esquema de medições de microdureza na parte não-deformada do material de aço ABNT 1050.

Tabela 3.2 - Microdureza na parte não-deformada do cavaco de aço ABNT 1050.

Amostra RCA2	Microdureza HV
1	219,0
2	254,0
3	219,0
4	250,0
5	214,0
Média	231,2

A Tab. 3.2 nos dá uma dureza média do material não-deformado de 231,2 HV. Comparando com os valores medidos no cavaco, quase todos os resultados apresentam valores superiores a 231,2 evidenciando a deformação presente no cavaco e conseqüentemente o encruamento no mesmo ocasionando um significativo aumento de dureza no material.

3º Análise: Nesta análise foram feitas medições de microdureza em uma maior área da raiz do cavaco a fim de comparar as zonas onde ocorre deformação do material, e também, onde o material continua não-deformado. Além disso, comparar como as deformações na zona de fluxo, nos planos de cisalhamento e ao longo do cavaco

influenciam a microdureza. Na Fig. 3.5 temos o esquema utilizado para a medição das microdurezas, e em seguida, temos na Tab. 3.3 os valores medidos das microdurezas das amostras de Aço ABNT 1050.

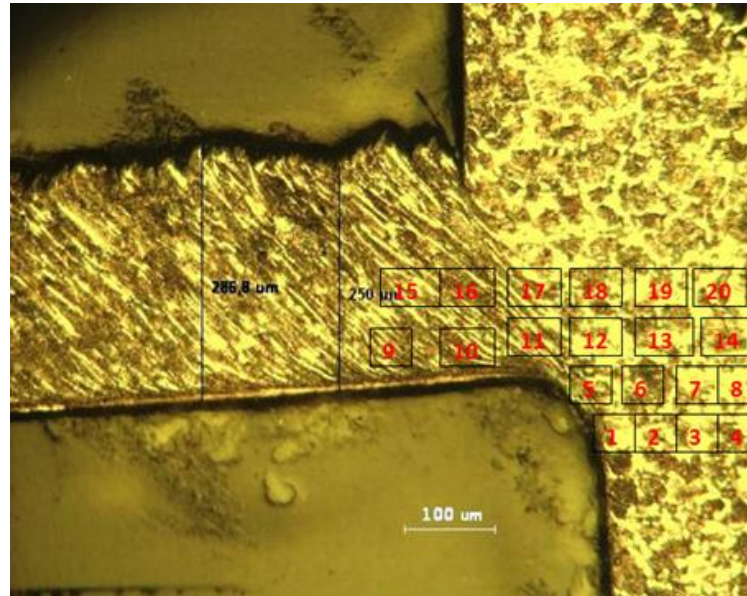


Figura 3.5 - Esquema de medições de microdureza na raiz do cavaco de aço ABNT 1050, sendo as condições de corte: $vc(m/min) = 74,89$, $f(m/rot) = 0,138$, $ap(mm) = 1,5$

Na Tab. 3.3 são apresentados os índices de dureza encontrados nas medições feitas na raiz do cavaco, conforme esquematizado na Fig. 3.5. Com o auxílio da tabela 3.3 e da Fig. 3.6 é possível observar que os maiores valores encontrados foram nos pontos nove e onze, que se encontram próximos à zona de fluxo e ao plano de cisalhamento primário, locais de grande deformação cuja dureza foi 531 e 472HV respectivamente.

Tabela 3.3 - Microdureza na raiz do cavaco de aço ABNT 1050

Amostra RCA2	Microdureza HV
1	237
2	230
3	218
4	289
5	297
6	256
7	216
8	203
9	531
10	309
11	472
12	237
13	252
14	239
15	406
16	354
17	381
18	301
19	232
20	292

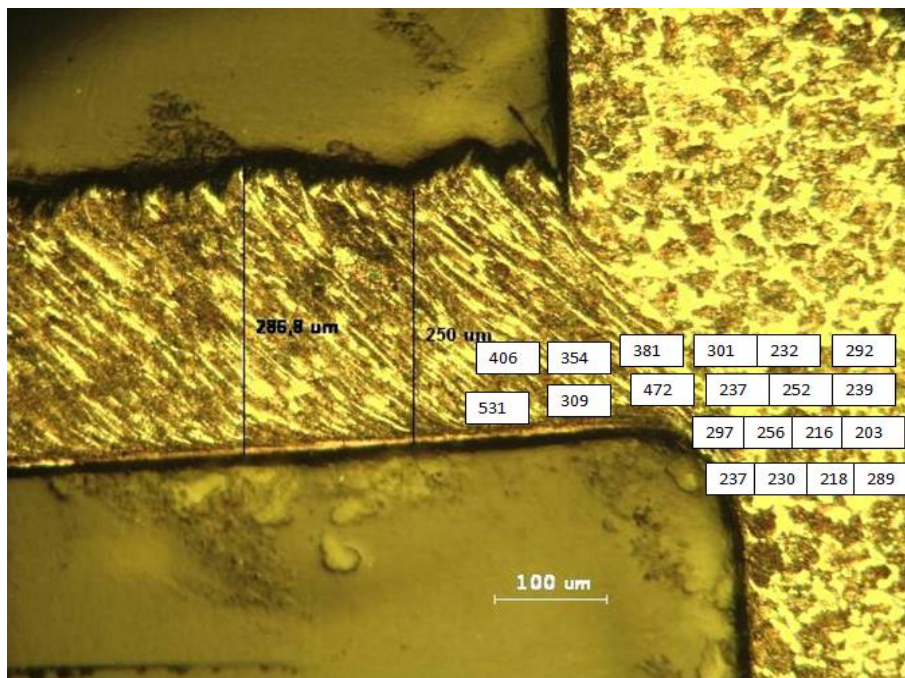


Figura 3.6 - Microdureza na raiz de cavaco de Aço ABNT 1050

3.1.2 Aço inoxidável ABNT 304

Da mesma forma como realizado no aço ABNT 1050 foram feitas cinco medidas ao longo do cavaco partindo da zona de fluxo com espaçamento igual entre elas a fim de investigar a variação da microdureza nestes pontos conforme a Fig. 3.7.

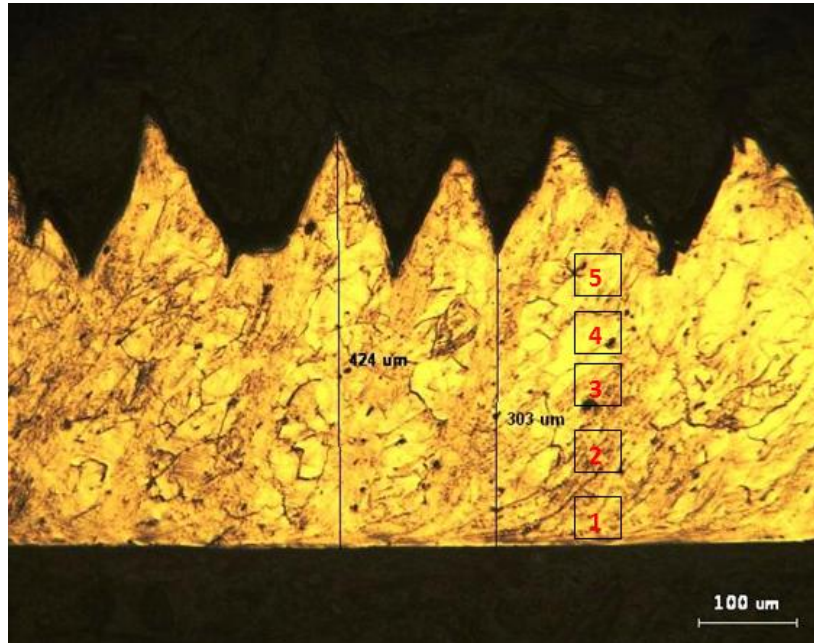


Figura 3.7 - Esquema de medições de microdureza no cavaco de aço inox ABNT 304.

A Tab. 3.4 apresenta os índices de microdureza encontrados nas amostras de aço inoxidável. Ao contrário do aço ABNT 1050 não existe uma discrepância de valores. Os índices de dureza estão numa mesma faixa, na centena de trezentos.

Tabela 3.4 - Microdureza ao longo da espessura de amostras do cavaco de aço Inoxidável ABNT 304.

Amostras	Microdureza HV				
	Pontos				
	1	2	3	4	5
I1	311	319	307	289	309
I2	339	280	329	336	312
I3	317	309	278	338	297
I4	320	282	319	262	306
I5	379	364	381	394	343
I6	338	322	352	366	315
I7	319	332	300	324	274
I8	354	320	304	392	282
I9	324	314	352	341	312
I10	338	329	352	325	322

3.1.3 Alumínio comercial

1º análise: Assim como nas amostras de Aço 1050 foram feitas medições igualmente espaçadas no Alumínio seguindo uma linha vertical a partir da zona de fluxo com o intuito de verificar a influência das deformações do cavaco na microdureza ao longo da espessura do cavaco, tanto na raiz como nos demais cavacos. O esquema de medição está representado nas Fig. 3.8 e Fig. 3.9 a seguir.

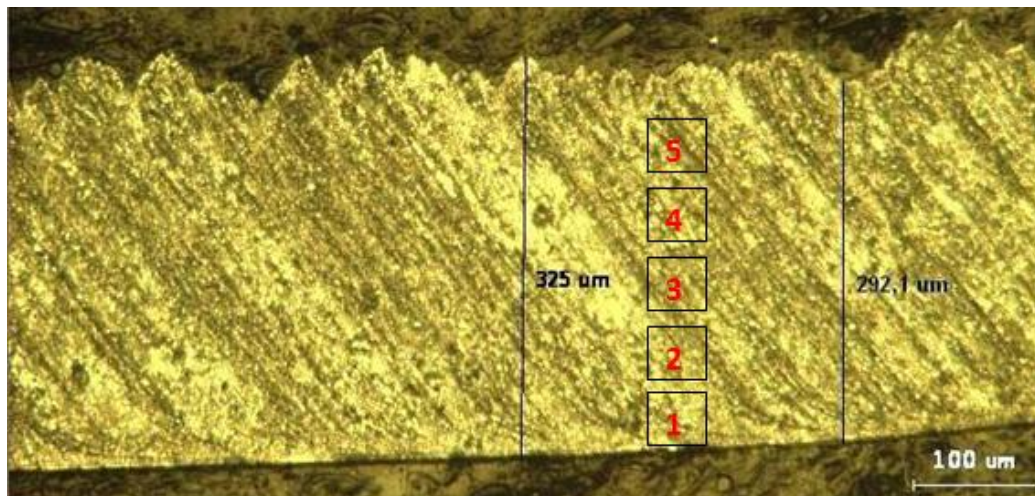


Figura 3.8 - Esquema de medições de microdureza ao longo da espessura do cavaco de alumínio.

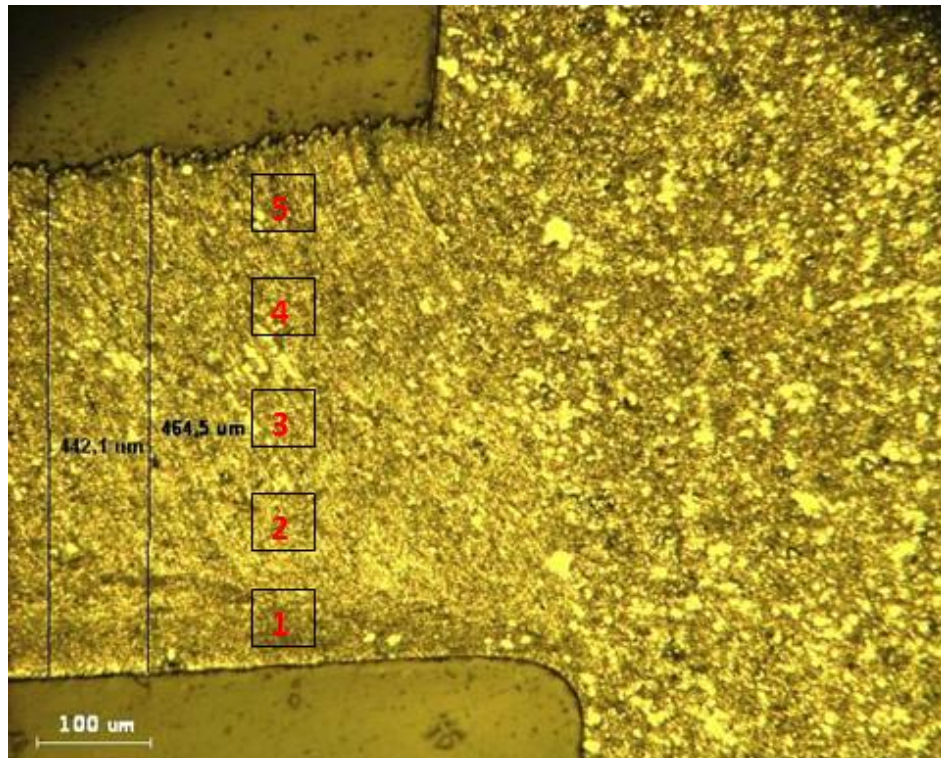


Figura 3.9 - Esquema de medições de microdureza ao longo da espessura na raiz do cavaco de alumínio

Os índices de microdureza das amostras de alumínio estão listados na Tab. 3.5. Nas raízes de cavaco é possível perceber uma leve tendência de aumento da microdureza quando partimos do ponto 1 em direção ao ponto 5, ou seja, à medida que se afasta da zona de fluxo, possivelmente causada pela deformação que é maior na zona de fluxo e vai diminuindo ao longo da espessura do cavaco, Fig. 3.10. Mas não é possível observar uma tendência de aumento ou redução da microdureza com a variação da velocidade de corte e avanço de corte tanto na raiz quanto nos demais cavacos.

Tabela 3.5 - Microdureza ao longo da espessura de amostras cavaco de alumínio

Amostras	Microdureza HV				
	Pontos				
	1	2	3	4	5
RCAL1	108	170	122	130	149
RCAL2	134	139	126	140	128
RCAL3	125	141	145	163	169
RCAL4	130	134	138	141	117
AL1	93,4	113	151	96,9	82
AL2	91,1	110	119	63,6	135
AL3	97,2	113	98,9	80,7	93,4
AL4	103	57,6	76,3	121	101
AL5	49,3	64,3	64,3	85,1	69,4
AL6	123	118	90,8	114	185
AL7	93,4	103	77,2	157	109
AL8	135	74,5	91,1	82,4	92,1
AL9	104	116	165	111	103
AL10	95,8	158	105	158	105

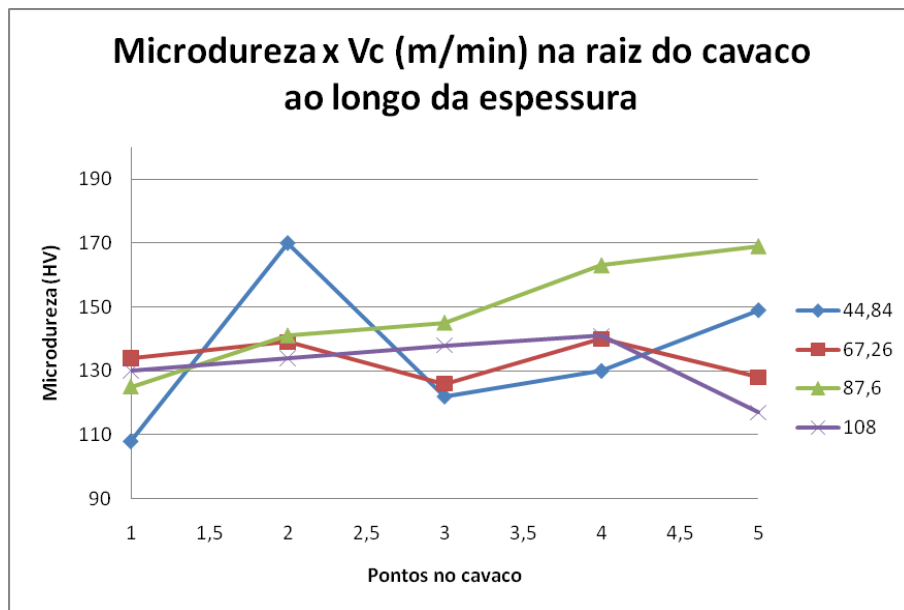


Figura 3.10 - Microdureza x Vc (m/min) na raiz do cavaco de alumínio ao longo da espessura

2º análise: Com o intuito de comparar as medidas de microdureza dos cavacos foram feitas medições na parte não deformada de material conforme mostrado na Fig. 3.11.

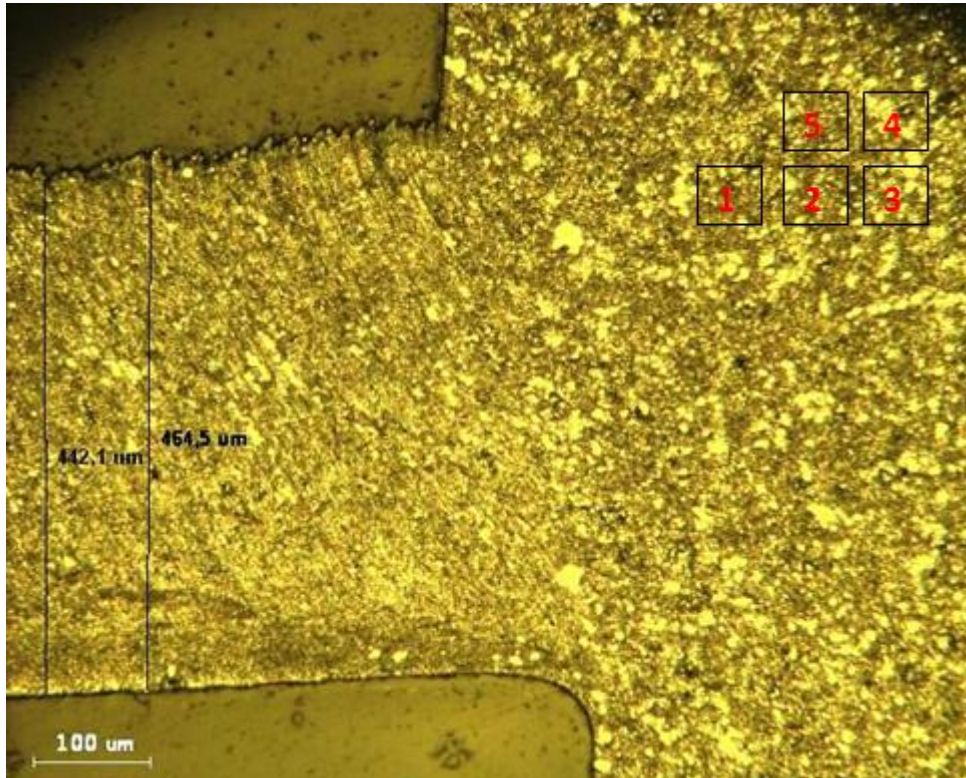


Figura 3.11 - Esquema de medições de microdureza na parte não-deformada do cavaco de alumínio.

A Tab. 3.6 nos leva a uma dureza média de 118,82 HV na parte não deformada do cavaco de alumínio. Comparando esse valor com os valores encontrados nos cavacos contidos na Tab. 3.5 há uma pequena dispersão para mais e para menos não evidenciando uma grande variação. A deformação nesse caso não foi parâmetro significativo.

Tabela 3.6 - Microdureza na parte não-deformada do cavaco de alumínio

Amostra RCAL1	Microdureza HV
1	126,0
2	131,0
3	124,0
4	93,1
5	120,0
Média	118,8

3º análise: Da mesma forma como feito para o aço ABNT 1050 foram feitas várias medidas em uma raiz de cavaco de alumínio tentando varrer desde a parte não deformada até a parte que abrange a zona de fluxo e os planos de cisalhamento para

investigar a variação da microdureza nestes locais. A figura 3.12 mostra o esquema de medições de microdureza da amostra de alumínio RCAL1 obtida com $V_c = 67,26$ m/min e $f = 0,138$ mm/rot.

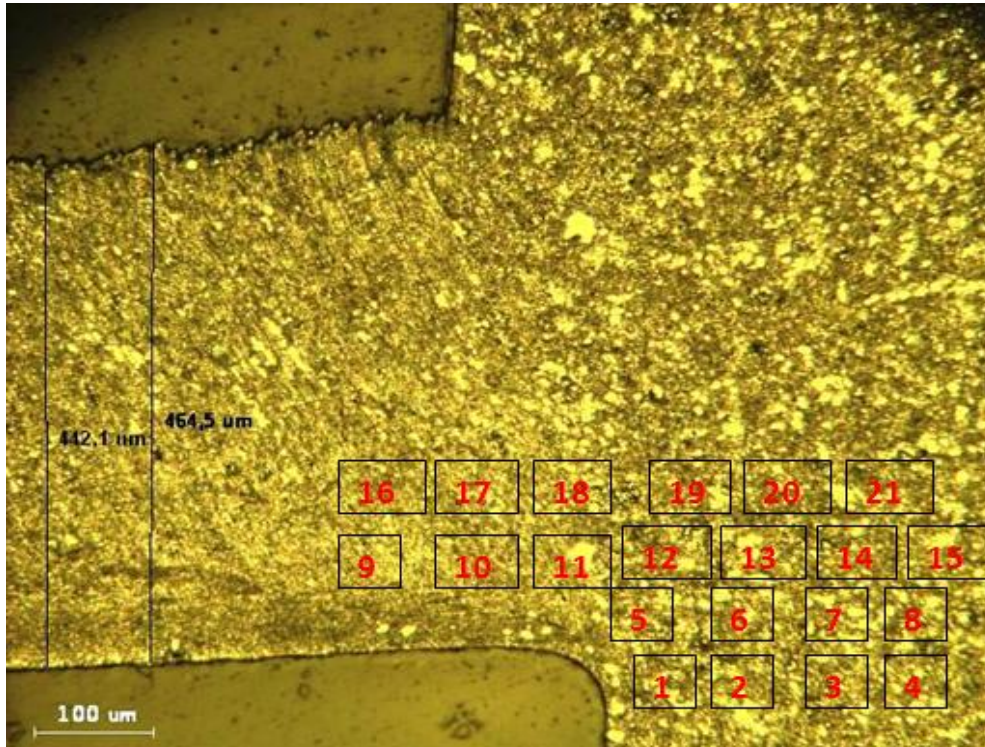


Figura 3.12 - Esquema de medições de microdureza na raiz do cavaco de alumínio

Os índices de microdureza obtidos a partir desta análise são listados na Tab. 3.7. Com a ajuda da Fig. 18 nota-se que os valores são relativamente semelhantes. Não se nota uma tendência de aumento. É interessante chamar atenção para o ponto 18 que apresentou maior dureza 165 HV, estando esse ponto sobre o plano primário de cisalhamento, zona de grande deformação no cavaco.

Tabela 4.7 - Microdureza na raiz do cavaco de alumínio

Amostra RCAL1	Microdureza HV
1	130,0
2	161,0
3	132,0
4	120,0
5	138,0
6	98,0
7	143,0
8	131,0
9	135,0
10	146,0
11	124,0
12	126,0
13	101,0
14	139,0
15	141,0
16	116,0
17	111,0
18	165,0
19	129,0
20	114,0
21	124,0

3.2 Comprimento Zona de Fluxo

Na zona de fluxo ocorre deformação em níveis tão altos que não é possível observar a presença de segunda fase do material. Ao mesmo tempo, o final da zona de fluxo não é bem definido. Por tanto a fim de quantificar a dimensão da zona de fluxo foi adotado um critério. A partir do momento em que era possível identificar a segunda fase no material, ou as linhas de deformação se alinhavam, esse ponto era adotado como o final da zona de fluxo

Nas Tab. 3.8 e 3.9 são apresentadas as dimensões da zona de fluxo encontradas nas amostras de cavaco de aço ABNT 1050. Na Tab. 3.10 estão as dimensões para o aço inoxidável ABNT 304 e nas Tab. 3.11 e 3.12 as dimensões da zona de fluxo para o alumínio.

Aço ABNT 1050

Tabela 3.8 - Dimensão da Zona de Fluxo nas amostras de raiz de cavaco (obtidas por quick-stop) do Aço ABNT 1050

Amostra	Dimensão da Zona de Fluxo (μm)
RCA1	9,83
RCA2	11,67
RCA3	13,33
RCA4	8,16

Tabela 3.9 - Dimensão da Zona de Fluxo nas amostras de cavaco de Aço ABNT 1050

Amostra	Dimensão da Zona de Fluxo (μm)		
	1	2	Média
A1	8,66	10,00	9,33
A2	11,33	11,17	11,25
A3	12,61	10,83	11,72
A4	9,65	10,00	9,82
A5	9,67	9,00	9,33
A6	12,67	12,67	12,67
A7	13,66	15,17	14,41
A8	13,35	13,50	13,42
A9	18,00	21,67	19,83
A10	21,67	20,83	21,25

Aço Inoxidável 304

Tabela 3.10 - Dimensão da Zona de Fluxo nas amostras de cavaco de aço inoxidável ABNT 304

Amostra	Dimensão da Zona de Fluxo (μm)		
	1	2	Média
I1	12,00	10,70	11,35
I2	11,30	10,70	11,00
I3	12,30	13,70	13,00
I4	9,67	9,67	9,67
I5	8,33	9,33	8,83
I6	12,33	12,67	12,50
I7	11,50	10,50	11,00
I8	13,50	12,33	12,91
I9	16,33	18,33	17,33
I10	18,33	17,33	17,83

Alumínio comercial

Tabela 3.11 - Dimensão da Zona de Fluxo nas amostras de raiz de cavaco do alumínio.

Amostra	Dimensão da Zona de Fluxo (μm)
RCAL1	12,00
RCAL2	9,55
RCAL3	14,33
RCAL4	7,66

Tabela 3.12 - Dimensão da Zona de Fluxo nas amostras de cavaco de Alumínio.

Amostra	Dimensão da Zona de Fluxo (μm)		
	1	2	Média
AL1	14,67	14,33	14,50
AL2	14,33	13,33	13,83
AL3	15,33	15,00	15,16
AL4	13,00	12,33	12,66
AL5	11,25	11,25	11,25
AL6	14,00	12,33	13,16
AL7	17,33	17,67	17,50
AL8	16,33	16,33	16,33
AL9	25,30	24,00	24,65
AL10	24,70	26,00	25,35

Com a ajuda das tabelas anteriormente citadas e dos gráficos das Fig. 3.13, 3.14 e 3.15 é possível observar a variação da dimensão da zona de fluxo em função da velocidade de corte na raiz do cavaco de aço ABNT 1050 e alumínio, e em função da velocidade de corte e avanço de corte nos cavacos obtidos na usinagem dos três materiais. Fazendo uma análise da Fig. 3.13 é possível perceber que primeiramente ocorre um aumento, um ponto de máximo e depois essa dimensão tende a cair. Esse aumento inicial acontece numa porção de velocidade de corte baixa de 40 a 60 m/min onde possivelmente existe a presença de aresta postiça de corte – APC que modifica inteiramente as condições da interface-cavaco ferramenta como discutido no início do trabalho.

Levando em conta as amostras seguintes pode-se notar uma ligeira diminuição da dimensão da zona de fluxo com o aumento da velocidade de corte. O mesmo acontece analisando a Fig. 3.14 onde há um aumento da dimensão da zona de fluxo em velocidades menores onde possivelmente existe APC. A partir do momento em que a velocidade de corte aumenta, existe uma tendência de diminuição da dimensão da zona de fluxo. À medida que a velocidade de corte aumenta menor é o tempo de contato entre

a ferramenta e o material fazendo com que o tempo que o cavaco tem para deformar seja menor, além de gerar mais calor, aumentando a temperatura, o que confina a deformação em zonas mais estreitas.

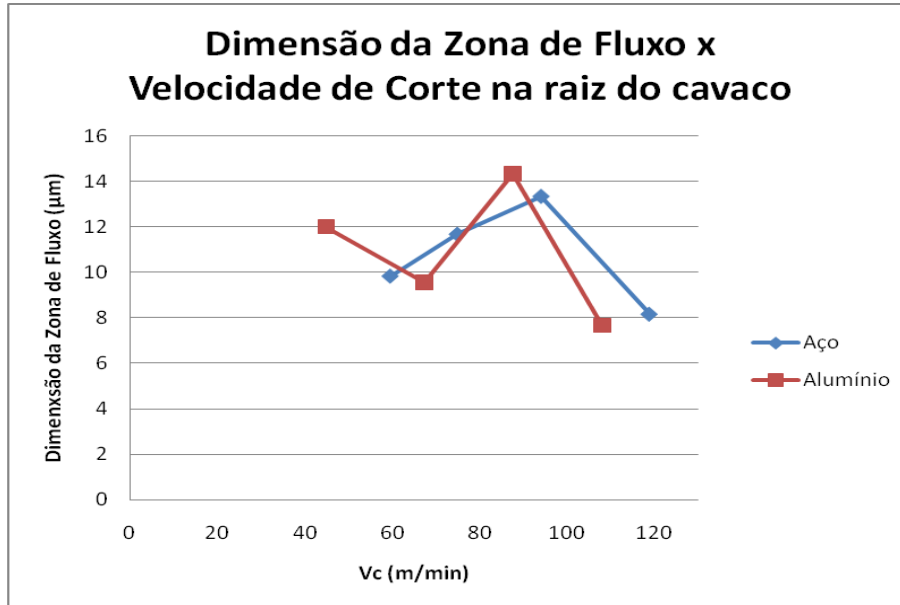


Figura 3.13 - Gráfico Dimensão da Zona de Fluxo x Velocidade de Corte na raiz do cavaco (amostras obtidas por quick-stop)

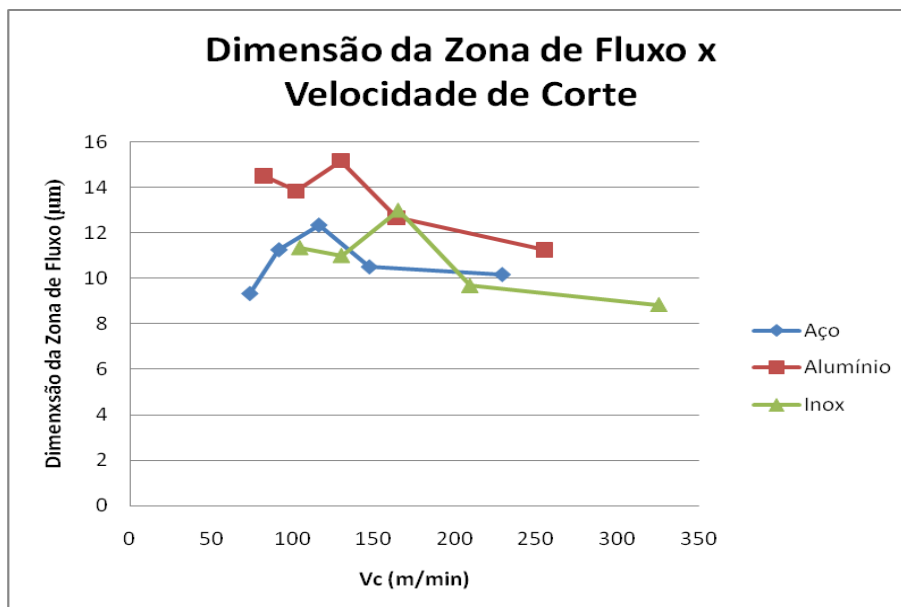


Figura 3.14 - Gráfico Dimensão da Zona de Fluxo x Velocidade de Corte

No caso da Fig. 3.15 o aumento do avanço de corte claramente evidencia um aumento da dimensão da zona de fluxo. O aumento do avanço de corte aumenta as

forças de usinagem e a temperatura no processo ocasionando numa maior deformação e consequentemente maior dimensão da zona de fluxo, zona de maior deformação no cavaco.

Outra observação importante de se fazer foi a de que o material mais dútil, alumínio, que consequentemente possui um grau de deformação maior apresentou maiores dimensões de zona de fluxo em comparação aos dois aços tanto na variação da velocidade de corte como no avanço de corte evidenciados pelas Fig. 3.14 e 3.15.

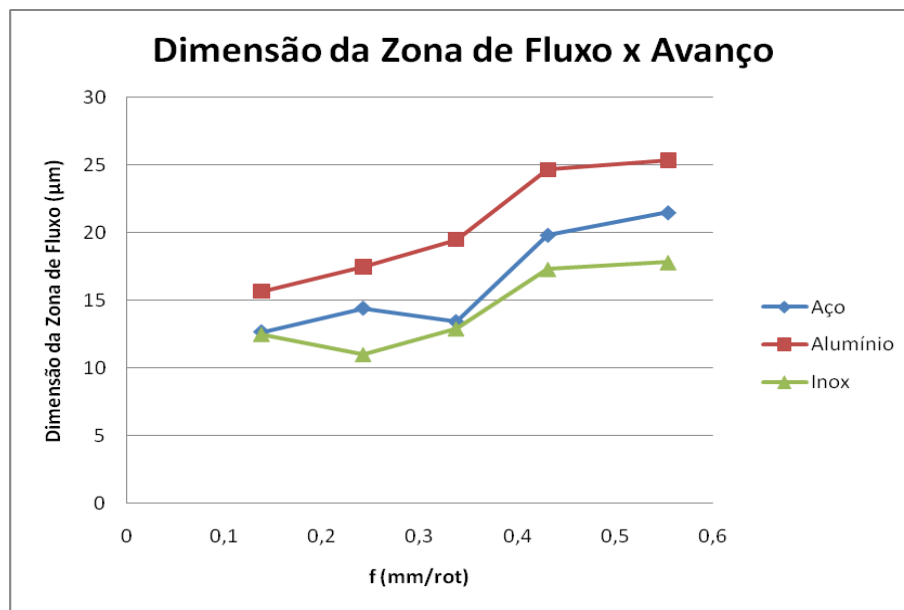


Figura 3.15 - Gráfico Dimensão da Zona de Fluxo x Avanço

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se a investigação de propriedades da zona de fluxo como a microdureza e das dimensões da mesma por meio de análise micrográfica das amostras de cavaco de três materiais: aço 1050, aço inoxidável 304 e alumínio. Os ensaios de usinagem foram realizados na oficina mecânica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU e as amostras foram analisadas no Laboratório de Tribologia e Materiais, no Laboratório de Metalografia da Fabricação e no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem.

A partir dos resultados obtidos de microdureza e dimensões da zona de fluxo que foram apresentados por tabelas e gráficos é possível chegar à algumas conclusões importantes:

- A microdureza do material diminui ao longo da espessura do cavaco a partir da zona de fluxo.
- À altas velocidades de corte, fora da faixa onde existe APC, a medida que a velocidade de corte aumenta a dimensão da zona de fluxo tende a diminuir.
- O aumento do avanço de corte implica em um aumento da dimensão da zona de fluxo, nos três materiais utilizados: aço ABNT 1050; aço inoxidável 304 e alumínio comercial.
- O alumínio, material mais dútil, possui dimensões de zona de fluxo maiores que os aços.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER Jr, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. 5.ed. Rio de Janeiro: LCT, 2002.

MACHADO, Álisson Rocha Machado; SILVA, Marcio Bacci da. Usinagem dos Metais. 2004. Apostila (Faculdade de Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MACHADO, Álisson Rocha; SILVA, Marcio Bacci da.; COELHO, Reginaldo Teixeira; ABRÃO, Alexandre Mendes. Teoria da Usinagem dos Metais. 1 ed. Uberlândia. Editora Blucher. 2009. 384p

TRENT, E.M., 1963, “Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools – Part II: Conditions of Seizure at the Tool/ Work Interface”, Journal of the Iron and Steel Institute, Nov. 1963, pp. 923-932.

TRENT, E.M. and WRIGHT, P.K., 2000, “Metal Cutting”, 4th Edition, Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-7069-X, 446 pags.

FERRARESI, D. "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1977, 751 pags.

SHAW, M.C.; BER, A. and MAMIN, P.A., 1960, "Friction Characteristics of Sliding Surfaces Undergoing Subsurface Plastic Flow", Trans ASMS, J Basic Eng, vol. 82, June, pp. 342-346.

TRENT, E.M., 1988a, "Metal Cutting and the Tribology of Seizure: I-Seizure in Metal Cutting", Wear, vol. 128, pp. 29-46.

TRENT, E.M., 1988b, "Metal Cutting and the Tribology of Seizure: II-Movement of Work Material Over the Tool in Metal Cutting", Wear, vol. 128, pp.47-64.

TRENT, E.M., 1988b, "Metal Cutting and the Tribology of Seizure: III – Temperature in Metal Cutting", vol. 128, pp. 65-81.