

a adaptação tribológica do sistema, passando a um período quase constante e finalmente uma aceleração, promovendo, em alguns casos, num curto espaço de tempo o colapso da ferramenta. Podendo ser observado também nesta figura que na maioria das condições de corte para todos os materiais, que o sistema de aplicação de fluido de corte pelo MQF mostrou valores de desgaste mais elevados quando comparados a aplicação de jorro.

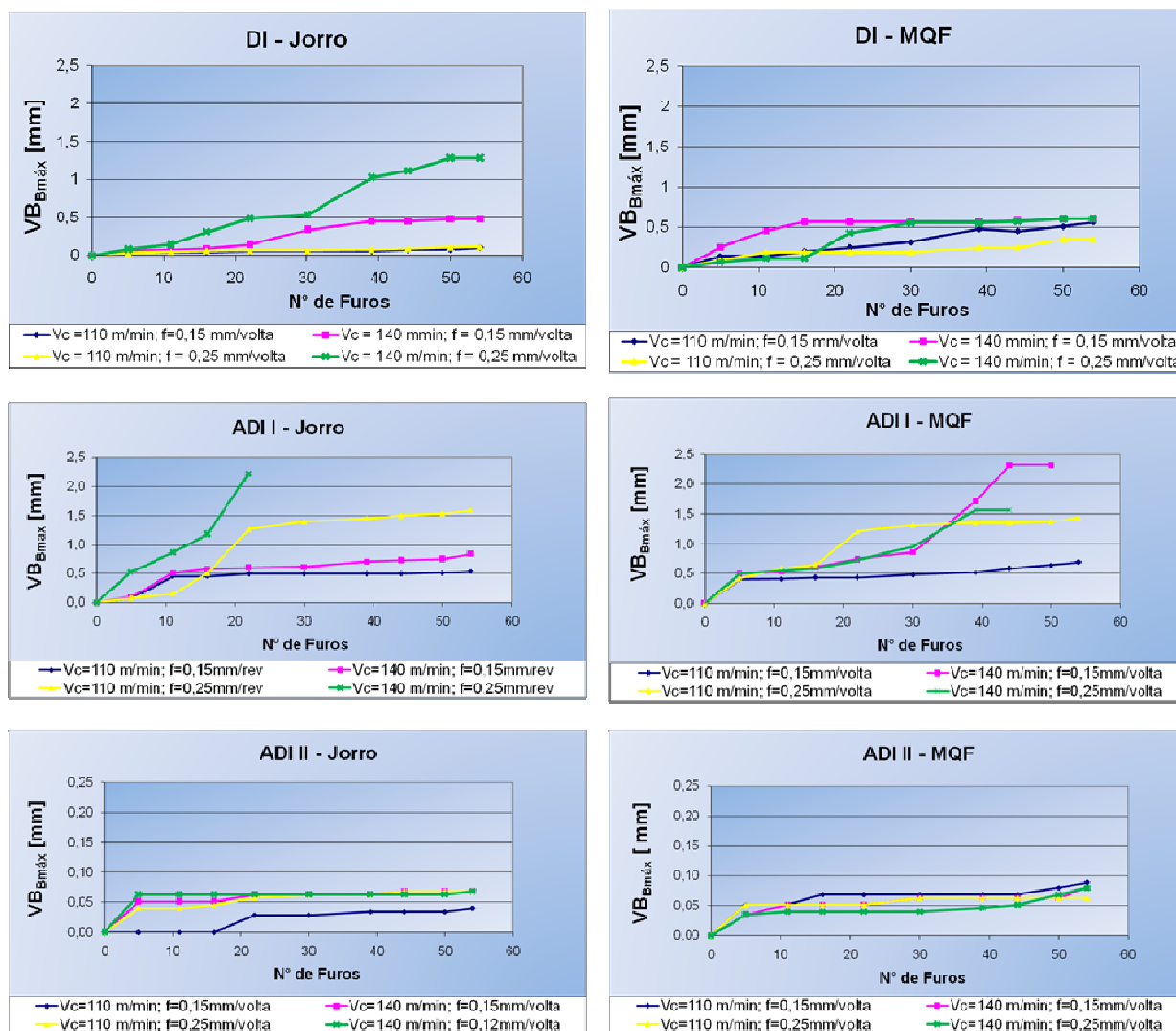


Figura 4.8 - Evolução do desgaste de flanco máximo para as diferentes condições de corte estudadas; (a) DI com sistema de aplicação de fluido de corte por jorro, (b) DI com sistema lubri-refrigerante por MQF, (c) ADI I com jorro, (d) ADI I com MQF, (e) ADI II com jorro e (f) ADI II com MQF

A Tabela 4.5 apresenta os valores de desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) obtidos no último furo de cada teste, compreendendo os resultados referentes ao DI em azul, em vermelho para ADI I e em branco para o ADI II.

Tabela 4.5 - Resultados de $VB_{Bmáx}$ do último furo

Material	Vc [m/min]	f [mm/volta]	Fluido de Corte	$VB_{Bmáx}$ [mm]
DI	110	0,15	Jorro	0,103
DI	140	0,15	Jorro	0,479
DI	110	0,25	Jorro	0,114
DI	140	0,25	Jorro	1,282
DI	110	0,15	MQF	0,558
DI	140	0,15	MQF	0,604
DI	110	0,25	MQF	0,347
DI	140	0,25	MQF	0,604
ADI I	110	0,15	Jorro	0,536
ADI I	140	0,15	Jorro	0,832
ADI I	110	0,25	Jorro	1,590
ADI I	140	0,25	Jorro	2,229
ADI I	110	0,15	MQF	0,701
ADI I	140	0,15	MQF	2,319
ADI I	110	0,25	MQF	1,436
ADI I	140	0,25	MQF	1,567
ADI II	110	0,15	Jorro	0,040
ADI II	140	0,15	Jorro	0,068
ADI II	110	0,25	Jorro	0,068
ADI II	140	0,25	Jorro	0,068
ADI II	110	0,15	MQF	0,089
ADI II	140	0,15	MQF	0,080
ADI II	110	0,25	MQF	0,063
ADI II	140	0,25	MQF	0,080

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram graficamente os resultados de desgaste de flanco máximo dos materiais nos diferentes métodos de aplicação de fluido de corte, em função das condições de corte utilizadas, podendo ser utilizado como índice de usinabilidade para a comparação dos ferros fundidos em estudo.

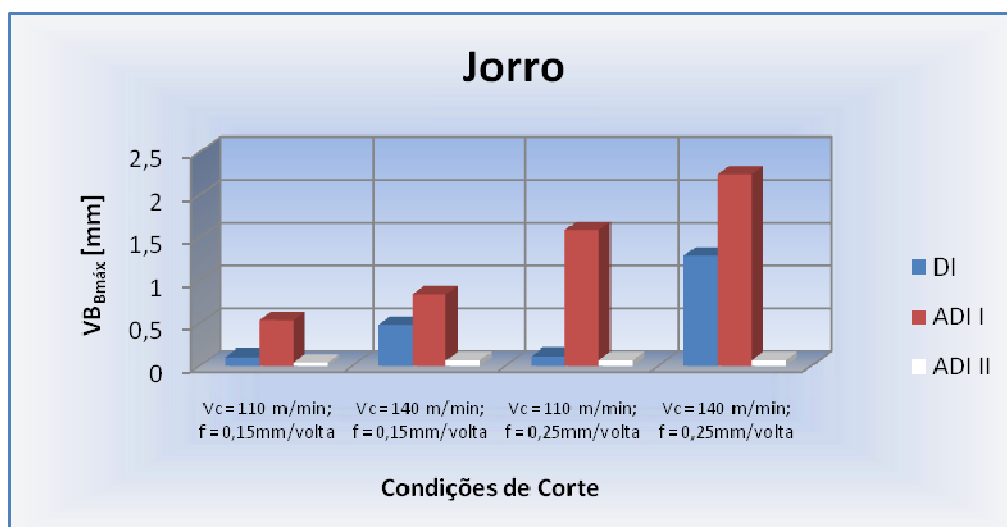


Figura 4.9 - Gráfico comparativo de $VB_{Bmáx}$ em função das condições de corte para aplicação de fluido de corte com jorro em abundância

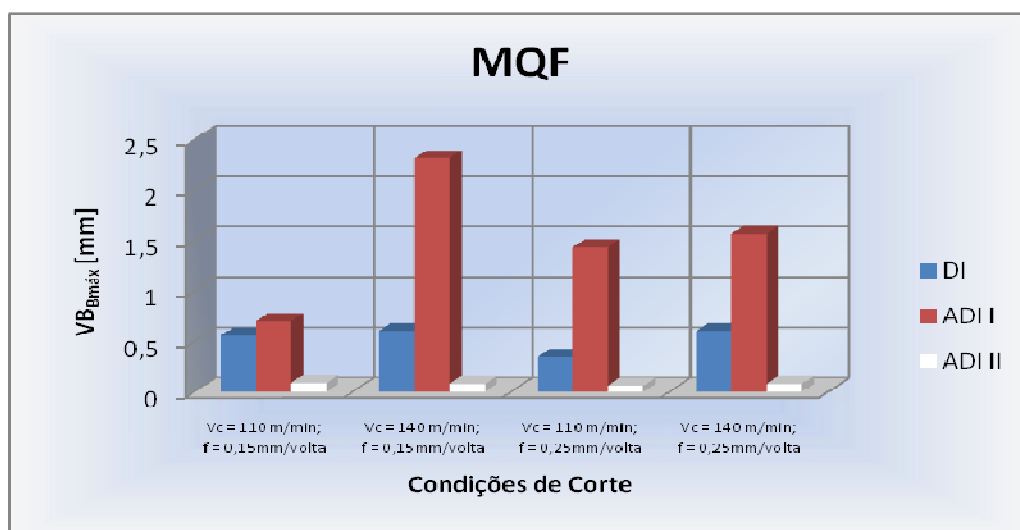


Figura 4.10 - Gráfico comparativo de $VB_{Bmáx}$ em função das condições de corte para aplicação de fluido de corte por MQF

Das Figuras 4.9 e 4.10 pode ser observado que o aumento da velocidade de corte fez com que o desgaste fosse acelerado. Para todas as condições e formas de aplicação de fluido de corte, o material que apresentou menores valores de desgaste e consequentemente a melhor usinabilidade foi o ADI II, seguido pelo DI e o material com a pior usinabilidade, ADI I, por apresentar os maiores resultados de $VB_{Bmáx}$. Pôde-se observar também que a condição mais severa, onde os desgastes foram maiores para todos os materiais, foi quando se combinou as máximas velocidade de corte e avanço juntamente com aplicação de fluido de corte por jorro em abundância, podendo ser visualizada na Fig 4.9 para o DI e ADI I, e podendo ser confirmada esta afirmação para o ADI I através da

Fig. 4.8 que mostra a falha da ferramenta antes de alcançar o fim de teste estabelecido em 54 furos.

As Tabelas 4.6 a 4.8 apresentam a análise de significância dos resultados de desgaste para uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância para a comparação dos materiais testados.

Tabela 4.6 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre ADI I e ADI II com referência ao desgaste de Flanco máximo ($VB_{Bmáx}$)

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	0,735375	0,106546	0,000978
Vc [m/min]	0,340000	0,213093	0,171476
f [mm/volta]	0,304500	0,213093	0,212395
Método de Aplicação de Fluido	0,113000	0,213093	0,618611
Material	1,331750	0,213093	0,001537
Vc x f	-0,143250	0,213093	0,531237
Vc x Método de Aplicação de Fluido	0,099250	0,213093	0,660972
Vc x Material	0,331000	0,213093	0,181059
f x Método de Aplicação de Fluido	-0,315250	0,213093	0,199099
f x Material	0,304000	0,213093	0,213034
Método de Aplicação de Fluido x Material	0,096000	0,213093	0,671207

Pode-se verificar da Tab. 4.6, que existe diferença significativa entre os ferros fundidos austemperados estudados, e que somente o material influenciou significativamente nos resultados de desgaste conduzindo a uma elevação deste de 1,33 mm em média, quando se passou de um nível (-1), ADI II com dureza de 207 HB e microestrutura composta por uma matriz bainítica com ferrita e resíduos de perlita fina, para um nível (+1), ADI I com dureza de 288 HB e uma matriz completamente bainítica. A diferença na dureza e na microestrutura dos materiais tem grandes responsabilidades por esta variação.

Na comparação entre o DI e o ADI II, Tab. 4.7 abaixo, diferentemente do resultado encontrado no teste de pressão constante, pode-se observar a existência de diferença significativa entre os materiais, e que além do tipo de material, tanto a velocidade de corte como a interação entre Vc e o material mostraram efeitos significativos nos resultados, por apresentarem um p menor que 0,05, mostrado na Tab. 4.7. Na coluna dos efeitos pode-se observar que houve uma elevação no nível de desgaste em média de 0,24 mm quando com o aumento da velocidade de corte; na mudança do ferro fundido austemperado, desta análise (ADI II), para o nodular perlítico também se pôde observar um aumento médio na resposta de 0,44 mm; e finalmente para a interação entre a velocidade de corte e o tipo de material o desgaste aumentou em média 0,22 mm quando se passou de um nível (-1) para

um nível (+1). A razão pela qual a velocidade de corte apresentou efeito significativo deve-se ao fato de que altas velocidades de corte envolvem altas temperaturas e juntamente com o tipo de material usinado pode conduzir a falhas na ferramenta. Maiores temperaturas aceleram os mecanismos termicamente ativados (principalmente difusão) e reduzem a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, aumentando a taxa de deterioração das mesmas (Machado et al., 2009; Trent e Wright, 2000). Além disto, maiores velocidades de corte na furação implicam em maiores rotações da broca, aumentando as vibrações, causando maior vulnerabilidade ao aparecimento de lascamentos na ferramenta, como os observados na usinagem do ferro fundido nodular perlítico da Fig. 4.5.

Tabela 4.7 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI II com referência ao desgaste de Flanco máximo ($VB_{Bmáx}$)

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	0,290438	0,047039	0,000267
Vc [m/min]	0,235375	0,094078	0,036832
f [mm/volta]	0,075625	0,094078	0,444709
Material	0,441875	0,094078	0,001548
Vc x f	0,125125	0,094078	0,220182
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-0,157625	0,094078	0,132371
Vc x Material	0,226375	0,094078	0,042758
f x Método de Aplicação de Fluido	-0,134875	0,094078	0,189577

Tabela 4.8 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI I com referência ao desgaste de Flanco máximo ($VB_{Bmáx}$)

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	0,956312	0,092426	0,000003
Vc [m/min]	0,566375	0,184852	0,013485
f [mm/volta]	0,379625	0,184852	0,070195
Método de Aplicação de Fluido	0,121375	0,184852	0,527863
Material	0,889875	0,184852	0,000955
f x Método de Aplicação de Fluido	-0,436625	0,184852	0,042460
f x Material	0,228875	0,184852	0,246982

A Tabela 4.8 compara o ferro fundido nodular perlítico (DI) com o ferro fundido austêmperado (ADI I), demonstrando a diferença significativa entre os dois materiais, e as variáveis com efeitos significativos nos resultados do desgaste. Neste caso, o aumento de Vc também conduziu a uma elevação na resposta, em média de 0,57 mm. O material foi a variável mais influente, conduzindo a um aumento nos valores de desgaste, em média, de

0,89 mm quando se passou a utilizar o ADI I no lugar do DI. Também pode ser observado na Tab. 4.8 que ocorreu uma influência da interação entre o avanço com o tipo de aplicação de fluido de corte, levando a uma redução média de $VB_{Bmáx}$ de 0,44 mm, quando se passou do nível (-1) para o nível (+1). O aumento da velocidade de corte causa elevação da temperatura que conduz à deterioração da ferramenta mais rapidamente, pois além de acelerar os mecanismos termicamente ativados, reduz a resistência da ferramenta, fazendo com que o desgaste seja acelerado com o aumento deste parâmetro. Finalmente pode-se observar que a interação entre o avanço e o tipo de aplicação de fluido (quando se passou de jorro para MQF) reduziu o desgaste, e isso pode ser devido provavelmente à diminuição da temperatura juntamente com uma melhor lubrificação do sistema, ou melhoria das condições de lubri-refrigeração na zona de corte com o uso do MQF.

Todos estes resultados conduzem a uma explicação estatística da comparação da usinabilidade dos materiais estudados com relação ao desgaste, podendo assim afirmar que o material com a melhor usinabilidade foi o ADI II seguido pelo DI e que a pior usinabilidade foi atribuída ao ADI I. Esta diferença na usinabilidade pode estar relacionada com a dureza dos materiais (207, 263 e 288 HB, respectivamente) e suas diferentes microestruturas (matriz bainítica com ferrita e resíduos de perlita fina, além de nódulos de grafita para o ADI II; matriz perlítica com pouca ferrita e nódulos de grafita para o DI; e uma matriz completamente bainítica e nódulos de grafita para o ADI I), ou seja, quanto maior a dureza do material maior a dificuldade na usinagem.

Resultados similares foram encontrados por Cakir e Isik (2008), que investigaram a usinabilidade de ADIs no processo de torneamento com várias temperaturas e tempos de austêmpera, que conferem ao material diferentes durezas, mostrando que materiais com durezas elevadas produzem maiores taxas de desgastes quando comparados com materiais com durezas inferiores.

Katuku et.al (2008), mostraram que na usinagem de ADI “ASTM Grade 2”, utilizando PCBN, em velocidades de corte até 200 m/min, as temperaturas são menores, o cavaco encrua e o aparecimento de abrasão (efeito mecânico) poderia ser esperado como sendo o mecanismo de desgaste dominante. Em velocidades entre 200 e 300 m/min as temperaturas são altas e existe uma evidência clara de início de recristalização. Sob estas condições o mecanismo de desgaste dominante esperado é por difusão que aparentemente se mantém até aproximadamente 600 m/min.

4.2.2 Força de Avanço e Torque

As Figuras 4.11 a 4.13 mostram a evolução da força de avanço (F_z) e do torque (M_z) ao longo do teste, nas diversas condições de corte utilizadas.

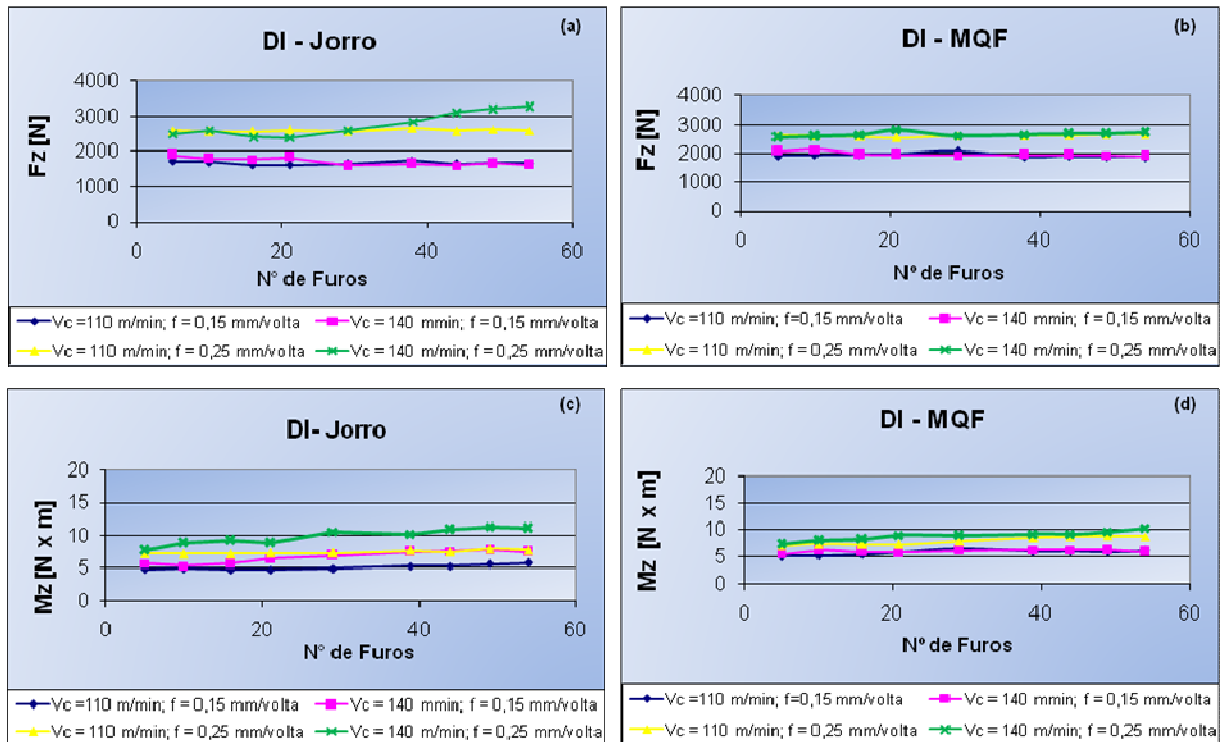


Figura 4.11 - Evolução da Força de avanço (F_z) e torque (M_z), referentes ao DI, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas; (a) F_z para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) F_z para MQF, (c) M_z para jorro e (d) M_z para MQF

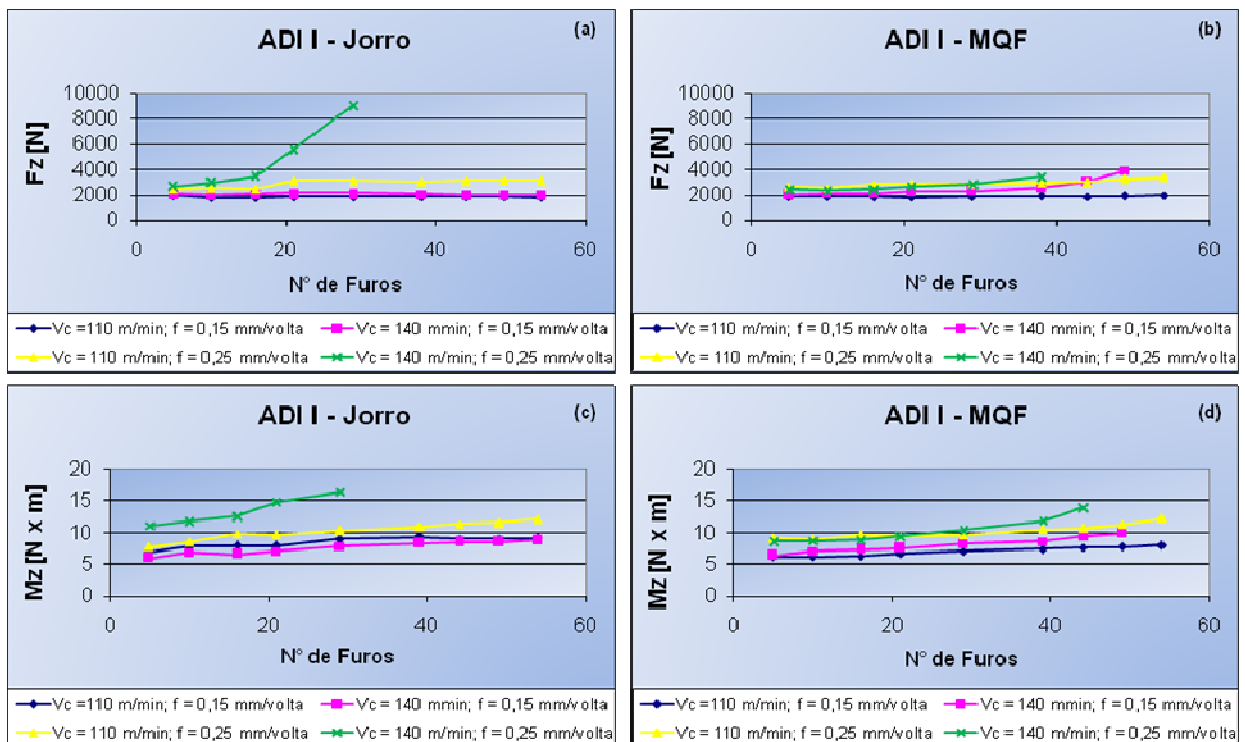


Figura 4.12 - Evolução da Força de avanço (F_z) e torque (M_z), referentes ao ADI I, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas; (a) F_z para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) F_z para MQF, (c) M_z para jorro e (d) M_z para MQF

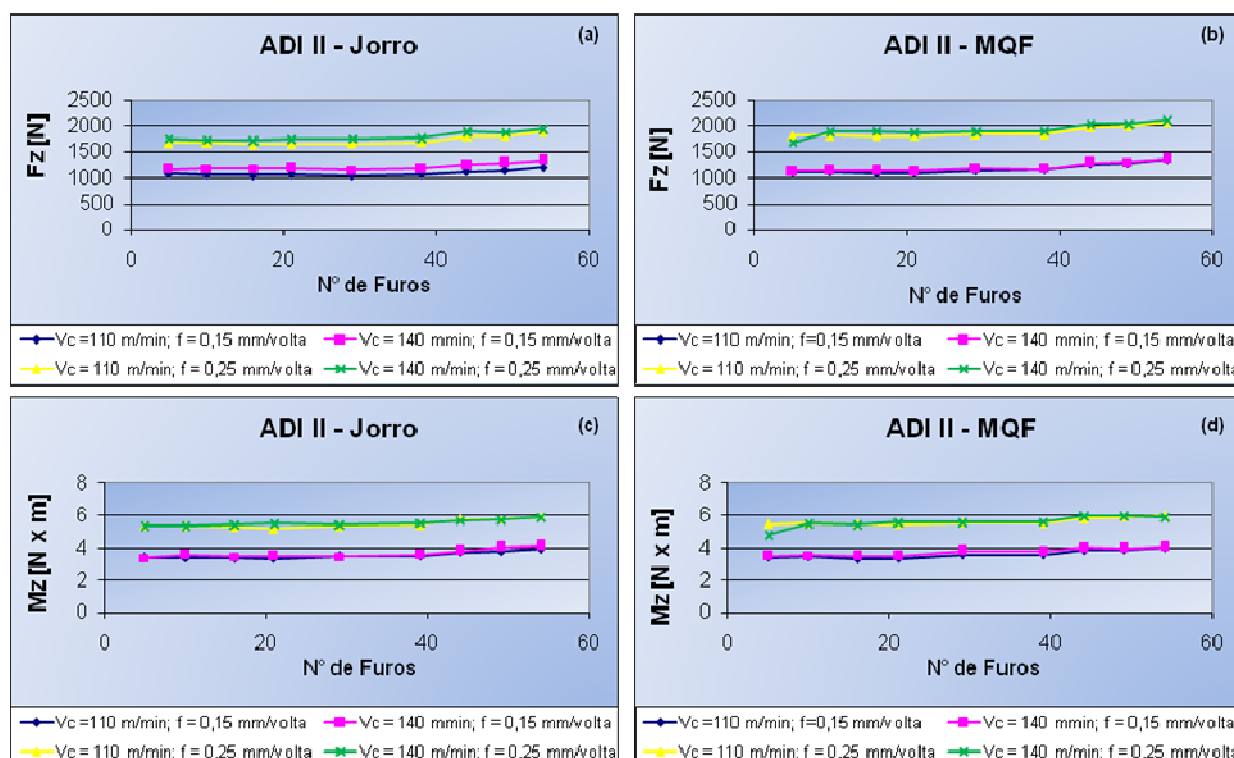


Figura 4.13 - Evolução da Força de avanço (F_z) e torque (M_z), referentes ao ADI II, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas; (a) F_z para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) F_z para MQF, (c) M_z para jorro e (d) M_z para MQF

Todos os resultados dos gráficos apresentados (Figs. 4.11 a 4.13) mostraram que tanto a força de avanço quanto o torque se mantiveram aproximadamente constante ao longo do teste, exceto para as condições de corte mais severas para o ADI I e DI onde se pode observar uma elevação das curvas ao longo do ensaio.

Para análise dos resultados referentes aos critérios de usinabilidade baseados na força de avanço e no torque, foram considerados apenas os resultados equivalentes aos primeiros furos do primeiro ciclo de furação da sequência realizada no corpo de prova de cada material em estudo. Esta prática foi adotada a fim de evitar a influência do desgaste nas respostas da análise estatística, pois mesmo os gráficos mostrando uma tendência aproximadamente constante nas forças de usinagem ao longo do teste houve resultados que fugiram um pouco desta linearidade (Figs. 4.11 a 4.13), devido às maiores taxas de desgaste desenvolvidas, como apresentadas e discutidas no item anterior. A Tabela 4.9 apresenta os resultados médios de F_z e M_z monitorados nos primeiros furos do ciclo inicial de furação do corpo de prova.

Tabela 4.9 – Resultados médios de F_z e M_z

Material	Vc [m/min]	f [mm/volta]	Fluido de Corte	F_z [N]	M_z [N x m]
DI	110	0,15	Jorro	1734	4,83
DI	140	0,15	Jorro	1896	5,69
DI	110	0,25	Jorro	2573	7,17
DI	140	0,25	Jorro	2498	7,60
DI	110	0,15	MQF	1920	5,13
DI	140	0,15	MQF	2083	5,47
DI	110	0,25	MQF	2617	7,16
DI	140	0,25	MQF	2550	7,42
ADI I	110	0,15	Jorro	1932	6,95
ADI I	140	0,15	Jorro	2088	6,00
ADI I	110	0,25	Jorro	2475	7,73
ADI I	140	0,25	Jorro	2650	11,14
ADI I	110	0,15	MQF	1848	6,14
ADI I	140	0,15	MQF	2019	6,34
ADI I	110	0,25	MQF	2618	9,18
ADI I	140	0,25	MQF	2451	8,66
ADI II	110	0,15	Jorro	1079	3,42
ADI II	140	0,15	Jorro	1163	3,39
ADI II	110	0,25	Jorro	1666	5,36
ADI II	140	0,25	Jorro	1760	5,37
ADI II	110	0,15	MQF	1109	3,43
ADI II	140	0,15	MQF	1125	3,51
ADI II	110	0,25	MQF	1812	5,48
ADI II	140	0,25	MQF	1688	4,81

As Figuras 4.14 a 4.17 apresentam os resultados comparativos de F_z e M_z dos materiais nos diferentes métodos de aplicação de fluido de corte para as várias condições de corte utilizadas.

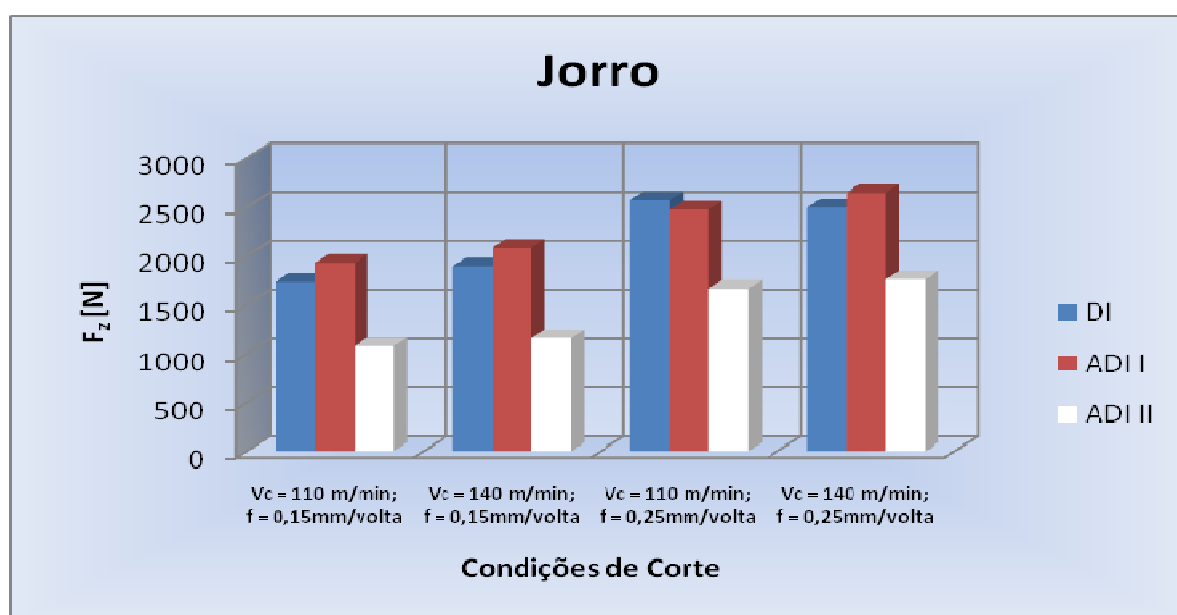


Figura 4.14 - Gráfico comparativo de F_z , para aplicação de fluido de corte com jorro em abundância nas condições de corte estudadas

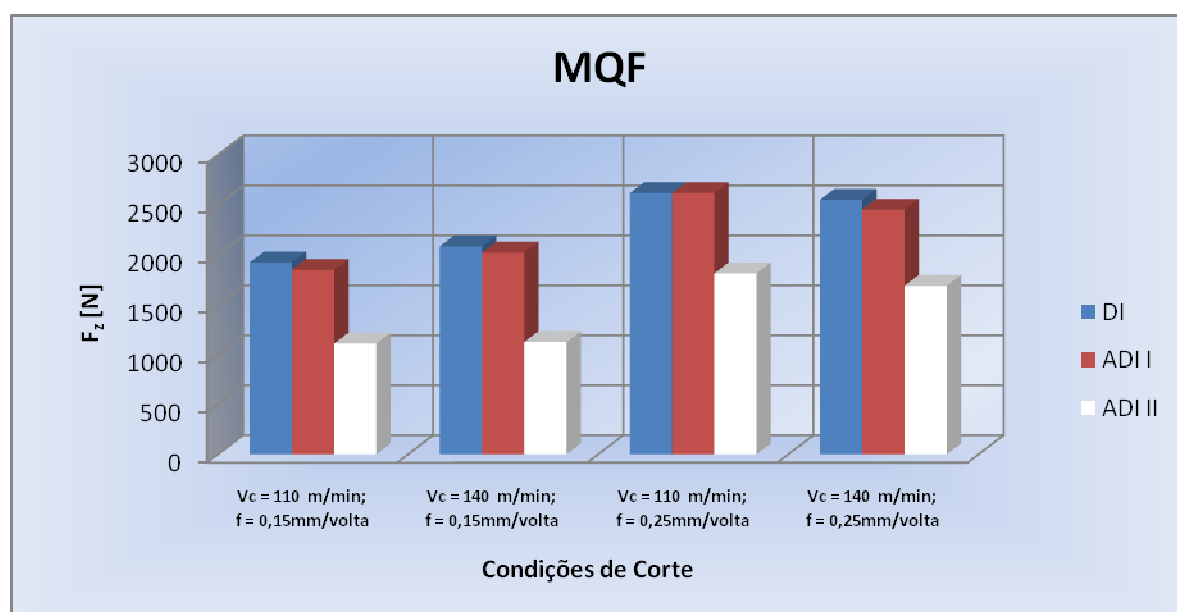


Figura 4.15 - Gráfico comparativo de F_z , para aplicação de fluido de corte por MQF nas condições de corte estudadas

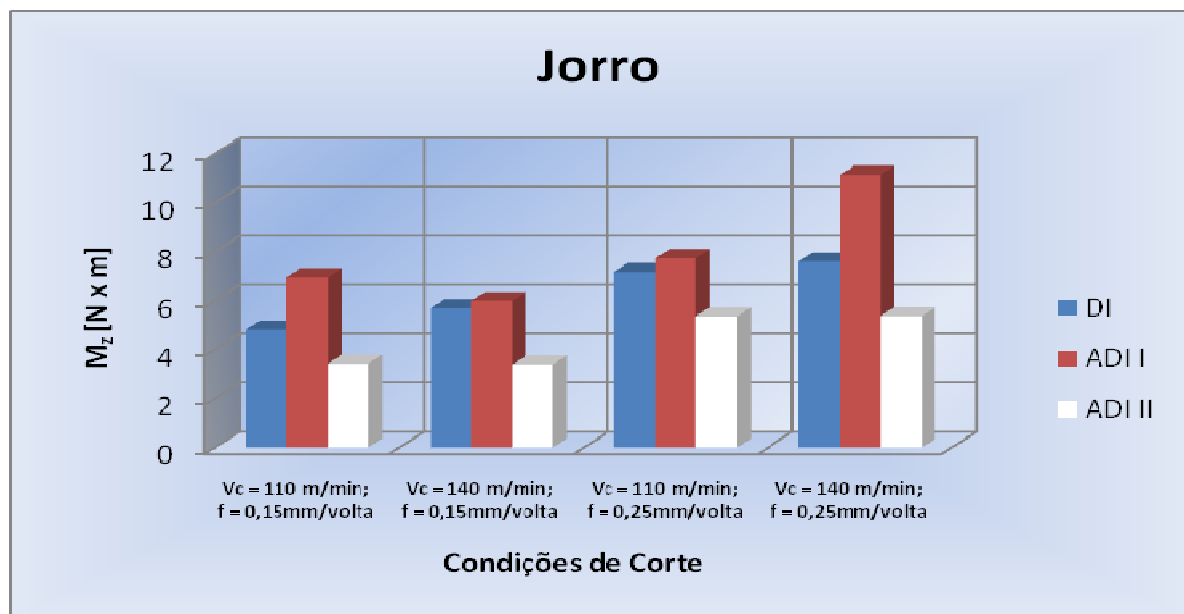


Figura 4.16 - Gráfico comparativo de M_z , para aplicação de fluido de corte com jorro em abundância nas condições de corte estudadas

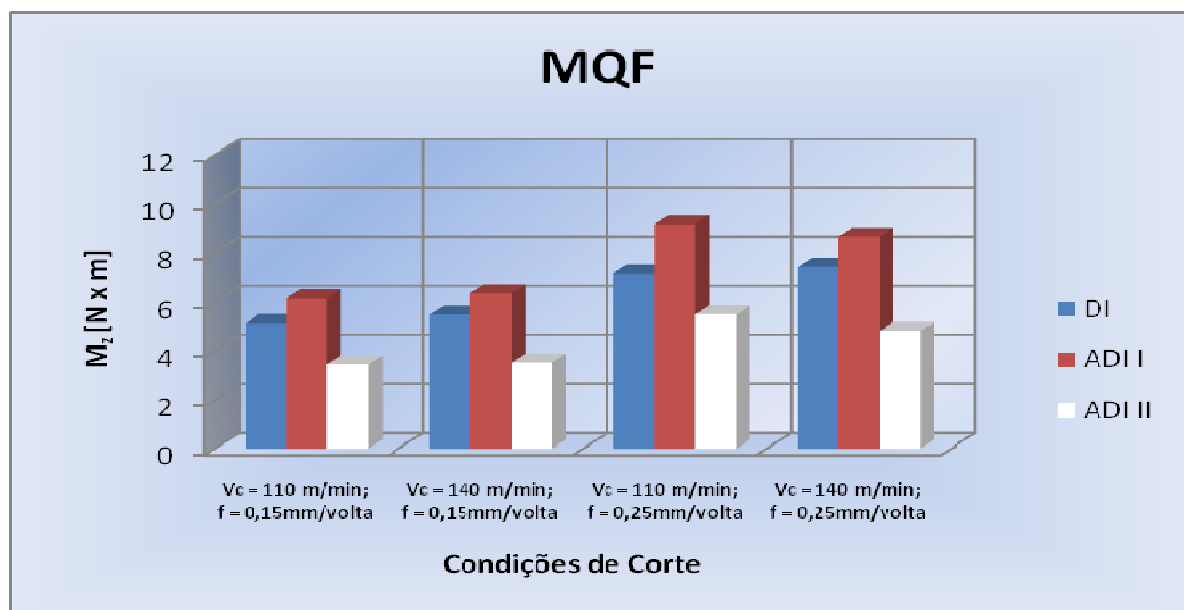


Figura 4.17 - Gráfico comparativo de M_z , para aplicação de fluido de corte por MQF nas condições de corte estudadas

Pode-se observar dos gráficos das Figs. 4.14 a 4.17 que o material que apresentou os menores valores de F_z e M_z e, portanto os melhores resultados de usinabilidade foi ADI II. Os resultados de M_z mostraram que o ADI I foi o pior material para se usar, ficando o DI com valores intermediários entre os austemperados. Contudo pode-se observar valores bem próximos para o ADI I e DI, referentes à F_z para os dois métodos de aplicação de fluido

de corte (Figs. 4.14 e 4.15).

As Tabelas 4.10 a 4.12 apresentam a análise de significância dos resultados de força de avanço no início dos testes de vida, para uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância.

Tabela 4.10 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre ADI I e ADI II com referência à F_z

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	1842,688	16,23858	0,000000
Vc [m/min]	50,625	32,47716	0,179787
f [mm/volta]	594,625	32,47716	0,000009
Método de Aplicação de Fluido	-17,875	32,47716	0,605739
Material	834,875	32,47716	0,000002
Vc x f	-56,125	32,47716	0,144538
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-76,625	32,47716	0,064803
Vc x Material	33,125	32,47716	0,354540
f x Método de Aplicação de Fluido	22,375	32,47716	0,521516
f x Material	-17,875	32,47716	0,605739
Método de Aplicação de Fluido x Material	-34,375	32,47716	0,338288

A Tabela 4.10 mostra que os materiais são significativamente diferentes e que tanto o material quanto o avanço têm influência significativa nos resultados de força de avanço, sendo o tipo de material a variável mais influente, que conduz a um aumento médio de 835 N quando se passa a utilizar o ADI I (288 HB) no lugar de ADI II (207 HB). O avanço contribui para uma elevação média de 595 N na resposta de F_z quando se muda de 0,15 mm/volta para 0,25 mm/volta. Este fato se deve, como exposto anteriormente, à dureza e microestrutura dos respectivos ADIs avaliados, que conduz a uma maior resistência durante a usinagem, ou seja, quanto maior a resistência ao cisalhamento nos planos de cisalhamento, maior será a força de usinagem (Machado et al., 2009). O aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário são influenciadas diretamente pelo aumento de f , o qual é responsável pelo aumento de F_z numa proporção direta.

A análise de significância, Tab. 4.11 abaixo, mostrou que existe diferença significativa entre o DI e o ADI II e que tanto f quanto o material tem influência significativa nos resultados, do mesmo modo que na comparação entre os ADIs mostrado anteriormente. O material conduz a um aumento de 809 N, em média, na resposta de F_z , quando se passa a utilizar o nodular perlítico bruto-de-fundição (263 HB) no lugar do ADI II (207 HB), e o avanço faz com que os resultados tenham uma elevação, em média, de 631 N quando se passa 0,15 mm/volta para 0,25 mm/volta.

Tabela 4.11 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre DI e ADI II com referência à F_z

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	1829,563	17,10658	0,000000
Vc [m/min]	31,625	34,21316	0,397721
f [mm/volta]	631,875	34,21316	0,000009
Método de Aplicação de Fluido	66,875	34,21316	0,108024
Material	808,625	34,21316	0,000003
Vc x f	-74,625	34,21316	0,080993
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-34,625	34,21316	0,357961
Vc x Material	14,125	34,21316	0,696822
f x Método de Aplicação de Fluido	-24,375	34,21316	0,508045
f x Material	19,375	34,21316	0,595660
Método de Aplicação de Fluido x Material	50,375	34,21316	0,200899

Como comentado, e analisando apenas os gráficos comparativos das Figs. 4.14 e 4.15 pode-se confirmar estatisticamente que não existe diferença significativa entre o DI e o ADI I quanto à comparação de usinabilidade avaliada através de F_z (Tab. 4.12). Neste caso apenas a força de avanço teve influência significativa nas respostas mantendo o exposto acima de que o aumento das áreas de cisalhamento, que são diretamente influenciadas pelo avanço, que conduz a um aumento da força de avanço, em média de 614 N, quando se muda do nível (-1) para o (+1).

Tabela 4.12 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre DI e ADI I com referência à F_z

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	2247,000	20,34223	0,000000
Vc [m/min]	64,750	40,68446	0,172369
f [mm/volta]	614,000	40,68446	0,000023
Método de Aplicação de Fluido	32,500	40,68446	0,460633
Material	-26,250	40,68446	0,547226
Vc x f	-98,250	40,68446	0,060495
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-39,750	40,68446	0,373425
Vc x Material	-19,000	40,68446	0,660137
f x Método de Aplicação de Fluido	-22,500	40,68446	0,604054
f x Material	37,250	40,68446	0,401885
Método de Aplicação de Fluido x Material	84,750	40,68446	0,091699

As tabelas 4.13 a 4.15 apresentam as análises de significância referentes ao momento torsor, M_z .

Tabela 4.13 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre ADI I e ADI II com referência à M_z

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	6,056875	0,244738	0,000002
Vc [m/min]	0,191250	0,489476	0,712094
f [mm/volta]	2,318750	0,489476	0,005163
Método de Aplicação de Fluido	-0,226250	0,489476	0,663333
Material	3,421250	0,489476	0,000923
Vc x f	0,366250	0,489476	0,487990
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-0,418750	0,489476	0,431347
Vc x Material	0,343750	0,489476	0,513841
f x Método de Aplicação de Fluido	-0,141250	0,489476	0,784488
f x Material	0,501250	0,489476	0,352776
Método de Aplicação de Fluido x Material	-0,148750	0,489476	0,773447

Com relação a M_z , a comparação da usinabilidade do ADI I com o ADI II mostra com 95% de confiabilidade e 5% de nível de significância que os materiais são diferentes significativamente e que tanto o avanço quanto o material apresentam efeitos significativos nos resultados de torque. A mudança de ADI II (207 HB) para ADI I (288 HB) causa um aumento médio de 3,42 Nm, enquanto que o aumento de f, de 0,15 mm/volta para 0,25 mm/volta, conduz com a uma elevação na resposta de M_z , em média, de 2,31 Nm, como mostrado na Tab.4.13. Estes efeitos se devem, da mesma forma que em F_z , ao aumento direto das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, causando uma elevação nos valores de M_z . Também, do mesmo modo, o aumento da resistência ao cisalhamento devido à microestrutura e dureza do material, contribui para a um aumento nos valores de torque.

Na análise de significância realizada (Tab. 4.14), comparando o ferro fundido nodular perlítico (DI) com o ADI II, com referência a M_z , pode-se observar que além do avanço e do material, a interação entre a velocidade de corte com o material influenciaram significativamente a resposta. Ao mudar o material de ADI II para DI o resultado de M_z apresentou uma elevação, em média, de 1,96 Nm. No caso do avanço, ao passar do nível -1 (0,15 mm/volta) para o nível +1 (0,25 mm/volta) M_z teve um aumento médio de 1,94 Nm e, finalmente, a interação entre Vc e o material conduziu a uma elevação da resposta de 0,31 Nm, em média, sendo que esta mudança no resultado quando se passou de um nível (-1) para (+1) é mais influenciada pelo material do que pela velocidade de corte, a qual não apresentou efeito significativo nas respostas.

Tabela 4.14 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre DI e ADI II com referência à M_z

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	5,327500	0,035768	0,000000
Vc [m/min]	0,160000	0,071537	0,075535
f [mm/volta]	1,937500	0,071537	0,000001
Método de Aplicação de Fluido	-0,052500	0,071537	0,495966
Material	1,962500	0,071537	0,000001
Vc x f	-0,152500	0,071537	0,086210
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-0,157500	0,071537	0,078928
Vc x Material	0,312500	0,071537	0,007233
f x Método de Aplicação de Fluido	-0,105000	0,071537	0,202090
f x Material	0,120000	0,071537	0,154296
Método de Aplicação de Fluido x Material	0,025000	0,071537	0,740973

Tabela 4.15 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre DI e ADI I com referência à M_z

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	7,03813	0,239682	0,000001
Vc [m/min]	0,50375	0,479363	0,341431
f [mm/volta]	2,43875	0,479363	0,003810
Método de Aplicação de Fluido	-0,20125	0,479363	0,692041
Material	1,45875	0,479363	0,028649
Vc x f	0,39125	0,479363	0,451511
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-0,43375	0,479363	0,407031
Vc x Material	0,03125	0,479363	0,950548
f x Método de Aplicação de Fluido	-0,10375	0,479363	0,837204
f x Material	0,38125	0,479363	0,462491
Método de Aplicação de Fluido x Material	-0,17375	0,479363	0,731825

Da mesma forma que no caso anterior, na comparação da usinabilidade entre DI e ADI I através de M_z, através de uma análise de significância com 95% de confiabilidade e 5% de nível de significância (Tab.4.15), mostrou que a variável mais influente nos resultados foi a taxa de avanço (f), seguido pelo tipo de material. Para este caso, o aumento de f conduziu a uma elevação de M_z de aproximadamente 2,44 Nm, em média, e a mudança para um material com maior dureza, DI (263 HB) para ADI I (288 HB), provocou um aumento de 1,46 Nm, em média nos valores de torque, como pode ser observado na coluna de efeitos da Tab. 4.15.

4.2.3 Potência e Vibração

As Figuras 4.18 a 4.20 apresentam a evolução da potência de corte (P_C) e da vibração ao longo do testes dos ferros fundidos experimentados nas diferentes condições de corte.

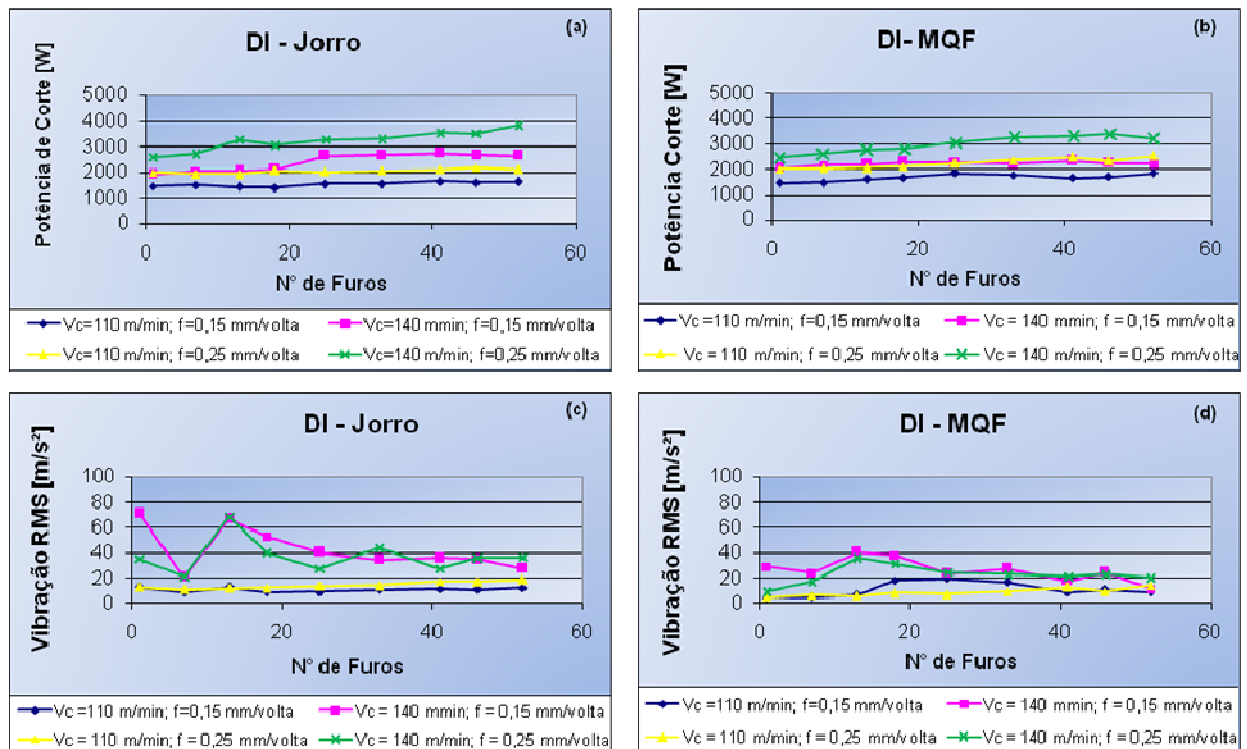


Figura 4.18 - Potência de Corte e vibração RMS, referentes ao DI, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas, (a) P_C para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) P_C para MQF, (c) Vibração para jorro e (d) Vibração para MQF

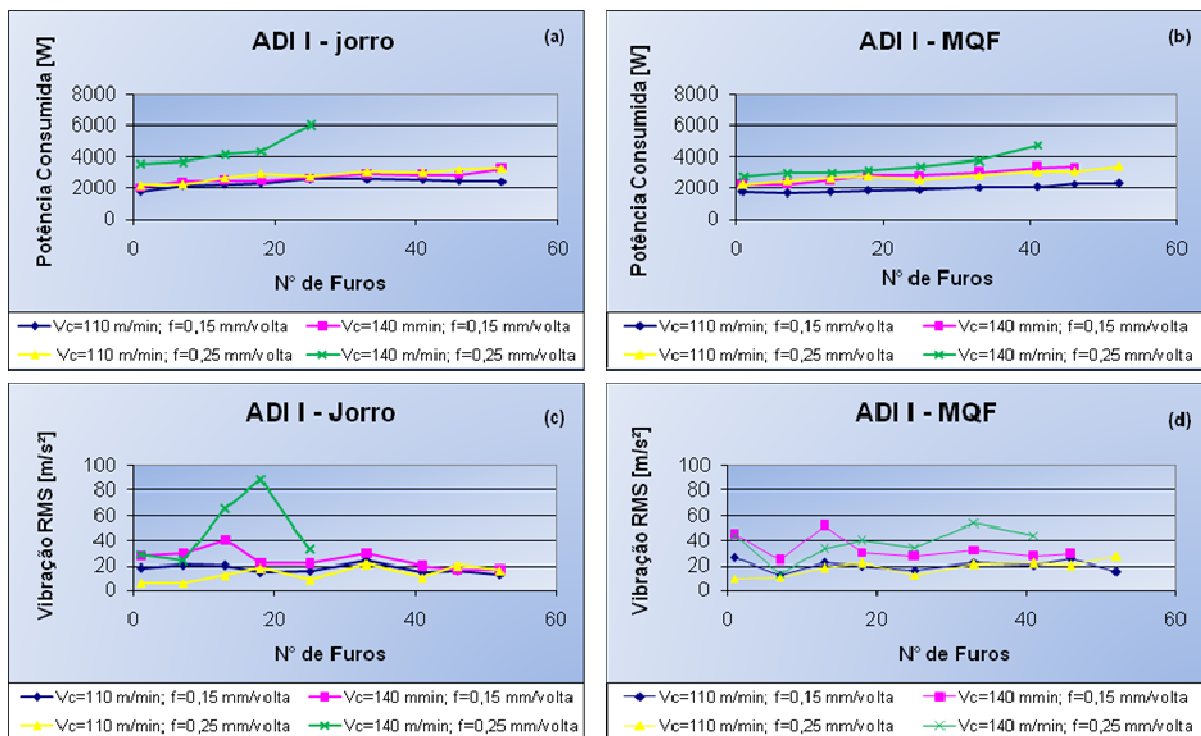


Figura 4.19 - Potência de Corte e vibração RMS, referentes ao ADI I, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas, (a) P_C para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) P_C para MQF, (c) Vibração para jorro e (d) Vibração para MQF

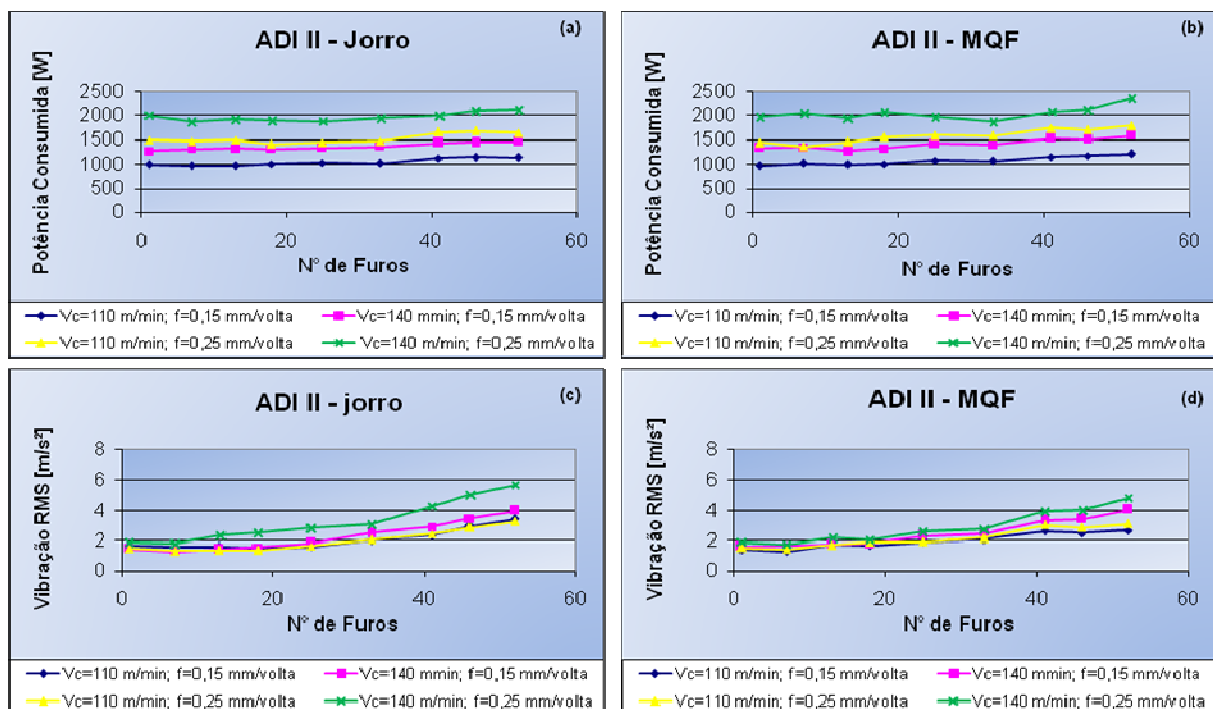


Figura 4.20 - Potência de Corte e vibração RMS, referentes ao ADI II, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas, (a) P_C para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) P_C para MQF, (c) Vibração para jorro e (d) Vibração para MQF

Os gráficos apresentados (Figs. 4.18 a 4.20) mostram um aumento gradual na potência de corte ao longo do teste e em alguns casos na vibração, também, que está relacionado com a evolução da taxa de desgaste, existindo ainda relação direta com a força e condições de corte. Em outros casos, a vibração mostra uma elevação inicial seguida por um decaimento, ou seja, com o aumento do desgaste de flanco a vibração aumenta até um determinado valor e a partir desse grau de desgaste a vibração tende a cair. Este comportamento parece depender fortemente dos lascamentos observados nas cunhas cortantes das brocas utilizadas, mostrados nas figuras 4.5 e 4.6. Comprova-se isto ao se observar os gráficos correspondentes ao ADI II (Fig. 4.20) que apresentaram somente curvas ascendentes e os desgastes das brocas utilizadas neste material que não sofreram lascamentos, como apresentado na figura 4.7.

Para análise dos resultados referentes aos critérios de usinabilidade baseados na potência de corte e na vibração, foram considerados apenas os resultados equivalentes aos primeiros furos do primeiro ciclo de furação da sequência realizada no corpo de prova de cada material em estudo. Esta prática foi adotada a fim de evitar a influência do desgaste nas respostas da análise estatística, pois há uma tendência de crescimento da potência e da vibração com o aumento do desgaste da broca (Figs.. 4.18 a 4.20), devido às maiores taxas de desgaste desenvolvidas, como apresentadas e discutidas no item anterior.

Foram adotados valores obtidos da média dos três primeiros furos realizados no corpo de prova de cada material, que é o mesmo procedimento referente a força e torque discutido no item 4.2.2. A Tabela 4.16 apresenta os resultados dos valores de potência de corte e de vibração médios, correspondentes aos utilizados para análise de significância e efeitos das variáveis significativas.

Tabela 4.16 - Resultados médios de potência de corte e vibração RMS

Material	Vc [m/min]	f [mm/volta]	Fluido de Corte	Potência de Corte [W]	Vibração RMS [m/s ²]
DI	110	0,15	Jorro	1445	12,74
DI	140	0,15	Jorro	1896	71,08
DI	110	0,25	Jorro	1987	12,8
DI	140	0,25	Jorro	2587	35,2
DI	110	0,15	MQF	1432	4,38
DI	140	0,15	MQF	2035	29
DI	110	0,25	MQF	2010	4,59
DI	140	0,25	MQF	2465	9,12
ADI I	110	0,15	Jorro	1741	18,09
ADI I	140	0,15	Jorro	2051	27,4
ADI I	110	0,25	Jorro	2178	6,39
ADI I	140	0,25	Jorro	3575	28,38
ADI I	110	0,15	MQF	1776	26,13
ADI I	140	0,15	MQF	2239	44,59
ADI I	110	0,25	MQF	2220	9,65
ADI I	140	0,25	MQF	2786	44,21
ADI II	110	0,15	Jorro	988	1,7
ADI II	140	0,15	Jorro	1278	1,43
ADI II	110	0,25	Jorro	1502	1,49
ADI II	140	0,25	Jorro	2007	1,89
ADI II	110	0,15	MQF	971	1,4
ADI II	140	0,15	MQF	1343	1,6
ADI II	110	0,25	MQF	1444	1,53
ADI II	140	0,25	MQF	1974	1,91

As Figuras de 4.21 até 4.24 mostram a comparação da usinabilidade dos materiais baseados na potência de corte e vibração para ambos os tipos de aplicação de fluido de corte.

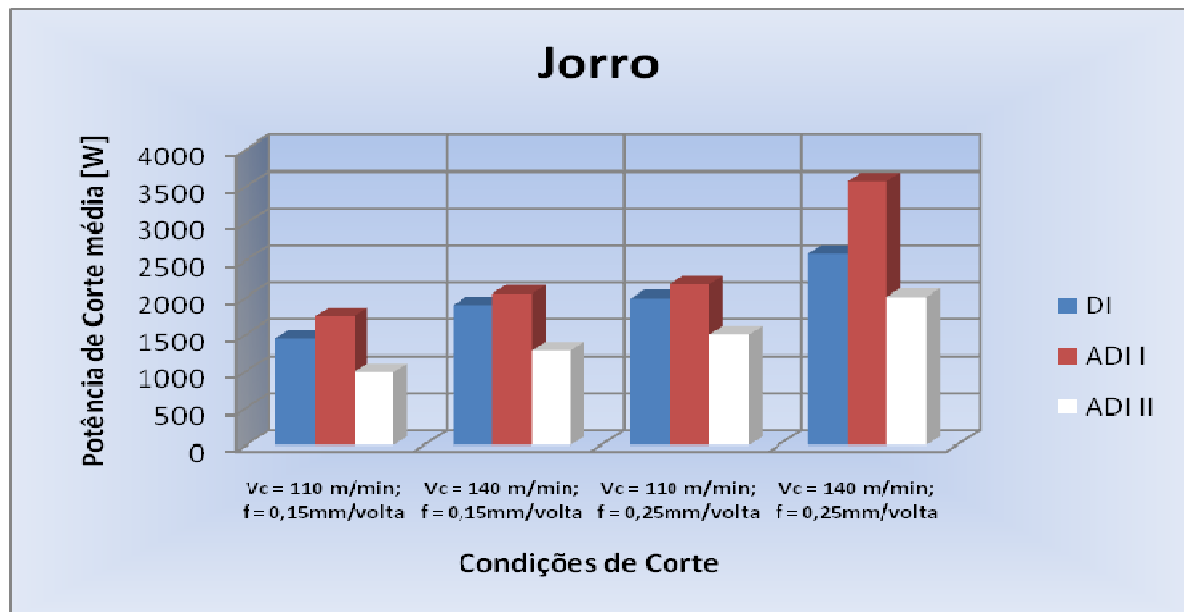


Figura 4.21 - Gráfico comparativo da potência de corte média, para aplicação de fluido de corte por jorro nas condições de corte estudadas

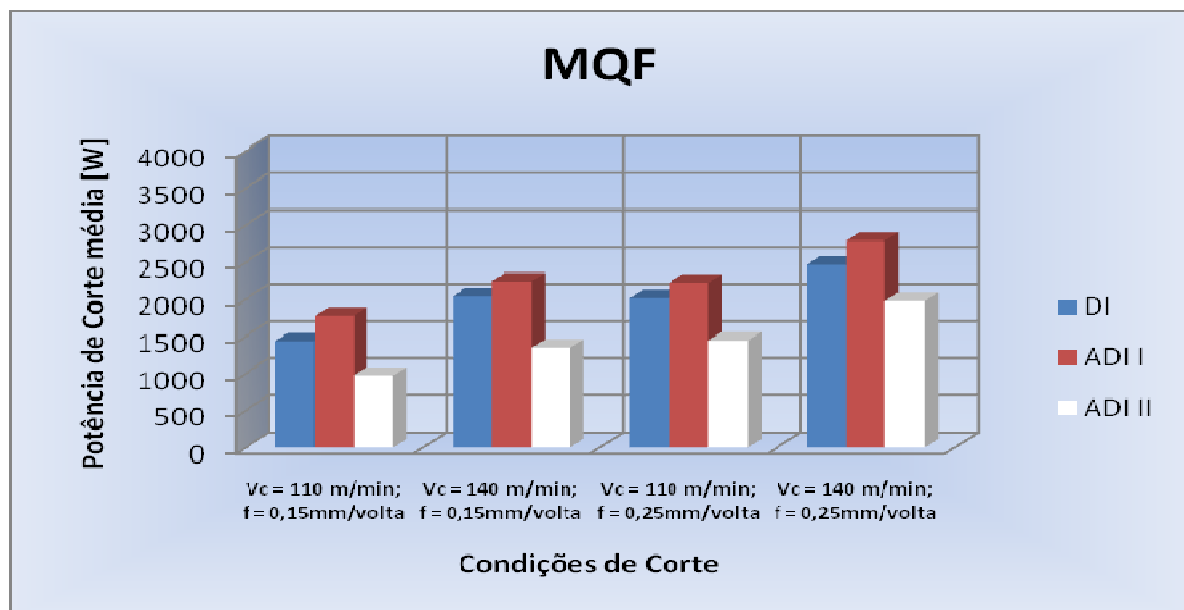


Figura 4.22 - Gráfico comparativo da potência de corte média, para aplicação de fluido de corte por MQF nas condições de corte estudadas

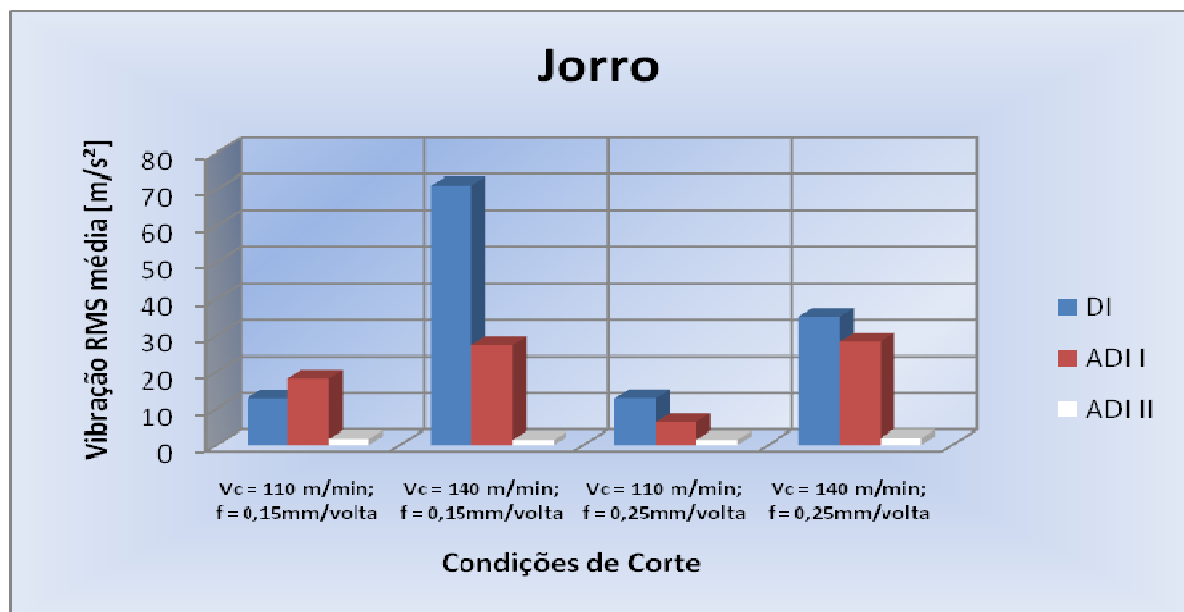


Figura 4.23 - Gráfico comparativo da vibração RMS média, para aplicação de fluido de corte por jorro nas condições de corte estudadas

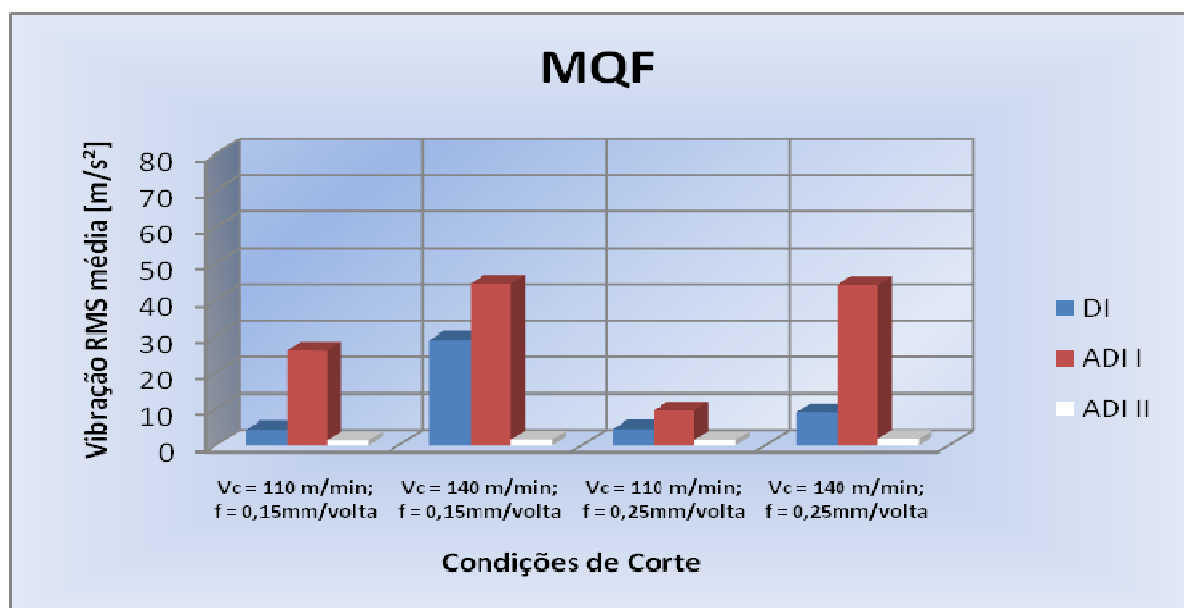


Figura 4.24 - Gráfico comparativo da vibração RMS média, para aplicação de fluido de corte por MQF nas condições de corte estudadas

Os gráficos apresentados nas Figs. 4.21 a 4.24 confirmam também para estas variáveis de saída a melhor usinabilidade do ADI II, por apresentar os menores valores de potência de corte necessária para a execução do furo e menores sinais de vibração durante a usinagem.

Para a potência de corte observa-se que, o segundo material com maior facilidade de usinagem foi o DI e o ADI I se mostrou com a pior usinabilidade dentre os três materiais. Para este critério a condição mais severa de usinagem compreendendo às maiores velocidade de corte e avanço, juntamente com sistema lubri-refrigerante por jorro em abundância, conduziu as maiores potências de corte.

Os resultados referentes à vibração, no entanto, mostraram que em três condições de corte avaliadas para o método de aplicação de fluido de corte por jorro, o material que demonstrou pior usinabilidade foi o DI, já no sistema de MQF o ADI I continuou sendo o mais difícil de usinar. Para esta variável de saída os máximos resultados foram compreendidos para a combinação entre a menor velocidade de corte com o maior avanço para o DI e ADI I, mas com jorro para o primeiro e MQF para o segundo. O ADI II mostrou valores mínimos de vibração, dentre eles o maior foi observado para a condição de corte mais severa (maiores V_c e f , e MQF).

As Tabelas 4.17 a 4.19 apresentam os resultados das análises de significância da comparação dos materiais e os efeitos das variáveis significativas, para uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância obtida pela média dos três primeiros furos executados no corpo de prova baseados na potência de corte.

Tabela 4.17 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre ADI I e ADI II, baseado na potência de corte, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova

	Efeito	Desvio Padrão.	p
Média	1879,563	55,3207	0,000000
V_c [m/min]	554,125	110,6414	0,004076
f [mm/volta]	662,375	110,6414	0,001865
Método de Aplicação de Fluido	-70,875	110,6414	0,549994
Material	882,375	110,6414	0,000500
$V_c \times f$	195,375	110,6414	0,137683
$V_c \times$ Método de Aplicação de Fluido	-71,375	110,6414	0,547290
$V_c \times$ Material	129,875	110,6414	0,293324
$f \times$ Método de Aplicação de Fluido	-138,625	110,6414	0,265637
$f \times$ Material	75,625	110,6414	0,524663
Método de Aplicação de Fluido $\times$ Material	-60,125	110,6414	0,610180

Os dados da Tab. 4.17 mostram a existência de diferença significativa entre os materiais. As variáveis que influenciaram significativamente na resposta da potência de corte foram: o tipo de material, que conduziu um aumento na potência de corte de 882 W, em média, quando se passou a usinar o ADI I (288 HB) ao invés do ADI II (207 HB); seguido pelo avanço, que elevou o valor da resposta, em média, de 662 W com o aumento de

0,15 para 0,25 mm/volta; e, finalmente, a velocidade de corte que também causa uma elevação na potência em 554 W, em média, com o aumento de Vc (110 para 140 m/min).

O efeito do material na elevação da resposta da potência de corte pode ser explicado, como nos casos das outras variáveis de saída investigadas, pelo aumento da resistência do material ao cisalhamento fazendo com que o sistema necessite elevar a potência para executar o furo. A influência da velocidade de corte era esperada, uma vez que o sinal é calculado pelo produto da força de corte por Vc (Machado et. al., 2009). A taxa avanço tem uma relação diretamente proporcional com a potência de avanço, afetando conseqüentemente os valores da potência efetiva de corte na mesma proporção (Machado et al., 2009).

Tabela 4.18 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre o DI e ADI II, baseado na potência de corte, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova

	Efeito	Desvio Padrão.	p
Média	1710,250	16,26672	0,000000
Vc [m/min]	475,750	32,53344	0,000027
f [mm/volta]	573,500	32,53344	0,000011
Método de Aplicação de Fluido	-2,000	32,53344	0,953362
Material	543,750	32,53344	0,000014
Vc x f	46,750	32,53344	0,210224
Vc x Método de Aplicação de Fluido	14,250	32,53344	0,679654
Vc x Material	51,500	32,53344	0,174273
f x Método de Aplicação de Fluido	-45,500	32,53344	0,220809
f x Material	-13,250	32,53344	0,700658
Método de Aplicação de Fluido x Material	8,750	32,53344	0,798710

Da mesma forma como esperado, os resultados da comparação entre o DI e o ADI II (Tab. 4.18) estão de acordo com o encontrado na análise realizada com os ADIs, mostrando a existência de diferença significativa entre os materiais e que o aumento do avanço (0,15 para 0,25 mm/volta), foi a variável mais influente nos resultados, conduzindo a uma elevação na resposta, em média, de 573 W, o aumento de Vc (110 para 140 m/min) contribuiu com uma elevação média da potência de 475 W e a mudança de material para um com maior dureza (ADI II com 207 HB contra DI com 263 HB) causou uma elevação nos resultados de potência de corte de 543 W, em média.

Na comparação entre DI e ADI I, a análise de significância apresentada na Tab. 4.19 como nos casos anteriores, mostra a existência de diferença significativa entre os materiais, de forma a promover uma elevação da potência de corte, em média, de 338 W quando se passa a utilizar o ferro fundido austemperado (288 HB) no lugar do DI (263 HB). Da mesma

forma como discutido nos outros casos a o aumento da velocidade de corte elevou a resposta da potência de corte em torno de 605 W e o avanço causou uma elevação média no sinal de 649 W quando se passou de 0,15 mm/volta para 0,25 mm/volta. Os efeitos destas variáveis significativas podem ser observados na coluna dos efeitos na Tab. 4.19.

Tabela 4.19 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI I, baseado na potência de corte, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova

	Efeito	Desvio Padrão.	P
Média	2151,438	59,6271	0,000000
Vc [m/min]	605,625	119,2542	0,003840
f [mm/volta]	649,125	119,2542	0,002841
Método de Aplicação de Fluido	-62,125	119,2542	0,624645
Material	338,625	119,2542	0,036267
Vc x f	148,875	119,2542	0,267159
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-83,875	119,2542	0,513242
Vc x Material	78,375	119,2542	0,540090
f x Método de Aplicação de Fluido	-149,375	119,2542	0,265752
f x Material	88,875	119,2542	0,489645
Método de Aplicação de Fluido x Material	-68,875	119,2542	0,588601

As Tabelas 4.20 a 4.22 apresentam os resultados da análise de significância, com 95% de confiabilidade e 5% de nível de significância, para a vibração RMS obtida pela média dos três primeiros furos executados no corpo de prova.

Tabela 4.20 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre ADI I e ADI II, baseado na vibração RMS, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova

	Efeito	Desvio Padrão	P
Média	13,61188	1,006401	0,000040
Vc [m/min]	10,62875	2,012803	0,003243
f [mm/volta]	-3,36125	2,012803	0,155800
Método de Aplicação de Fluido	5,53125	2,012803	0,040404
Material	23,98625	2,012803	0,000073
Vc x f	3,70375	2,012803	0,125132
Vc x Método de Aplicação de Fluido	2,77125	2,012803	0,227023
Vc x Material	10,45125	2,012803	0,003489
f x Método de Aplicação de Fluido	-0,74375	2,012803	0,726881
f x Material	-3,53375	2,012803	0,139505
Método de Aplicação de Fluido x Material	5,54875	2,012803	0,039990

Para a vibração, o avanço não aparece como variável significativa. A comparação dos ADIs apresenta diferença significativa entre os materiais, e mostra que além do material, o método de aplicação de fluido de corte, a velocidade de corte e a interação de Vc com o material acarretaram no aumento médio da vibração, quando se passou de um nível (-1) para um nível (+1), como mostra os efeitos em destaque na Tabela 4.20. O efeito da velocidade de corte na resposta da vibração é natural e se deve ao fato de que o aumento de Vc (110 para 140 m/min) é dado pelo aumento da rotação, que implica em maior instabilidade do conjunto máquina-ferramenta-peça. Do mesmo modo que ao utilizar MQF no lugar de jorro, o aumento da vibração está relacionado com a ineficiência do sistema MQF em retirar cavaco da região do corte. E por fim, a aumento da resistência do material que neste caso é conferido pela maior dureza e microestrutura (ADI II com uma dureza de 207 HB, que é conferida por uma matriz bainítica com ferrita e resíduos de perlita fina, e o ADI I com dureza 288 HB, que é dada por uma matriz completamente bainítica) conduz a uma maior solicitação da ferramenta causando instabilidade no sistema e conseqüentemente aumento da vibração.

Tabela 4.21 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre o DI e ADI II, baseado na vibração RMS, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova

	Efeito	Desvio Padrão	P
Média	11,9913	2,129917	0,001343
Vc [m/min]	13,8250	4,259835	0,017567
f [mm/volta]	-6,8500	4,259835	0,158950
Método de Aplicação de Fluido	-10,6000	4,259835	0,047267
Material	20,7450	4,259835	0,002795
Vc x f	-6,8975	4,259835	0,156533
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-6,3925	4,259835	0,184119
Vc x Material	13,6475	4,259835	0,018512
f x Material	-7,0225	4,259835	0,150338
Método de Aplicação de Fluido x Material	-10,5825	4,259835	0,047531

Na comparação da usinabilidade entre o ADI II e o DI, pode-se observar que a mudança de aplicação de fluido de corte de jorro para MQF, fez com que a resposta da vibração reduzisse, em média, de 10,6 m/s² e a interação entre o tipo de aplicação de fluido de corte e o material também reduziu a resposta, em média, de 10,6 m/s², que pode ser justificado pela ação lubrificante mais eficiente do MQF (maior poder de penetração na interface cavaco-ferramenta) que para este caso teve influencia mais significativa que a ineficiência do método em expulsar cavaco da região do corte. As demais variáveis significativas como esperado conduziram a um aumento da vibração tanto quanto se elevou

a velocidade de corte quanto se mudou o material para um com maior resistência, além da interação entre estas duas últimas variáveis, de forma que Vc causou um aumento médio na vibração de 13,8 m/s², o material elevou a resposta, em média de 20,75 m/s² e a interação entre estas duas variáveis de entrada conduziu a vibração a aumentar seu sinal, em média, de 13,65 m/s², como mostrado em destaque na Tab. 4.21.

A análise de significância (Tab.4.22) realizada entre o DI e o ADI I, não mostrou diferença significativa entre os materiais, e que neste caso apenas a velocidade de corte apresentou influência significativa na resposta de vibração, fazendo com que o sinal aumentasse, em média, de 24,27 m/s² com o aumento de Vc devido a maior instabilidade do sistema máquina-ferramenta-peça.

Tabela 4.22 - Análise de significância do planejamento 2⁴ realizado entre o DI e ADI I, baseado na vibração RMS, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	23,9844	3,258376	0,000727
Vc [m/min]	24,2763	6,516751	0,013638
f [mm/volta]	-10,3837	6,516751	0,171952
Método de Aplicação de Fluido	-5,0512	6,516751	0,473315
Material	3,2413	6,516751	0,640024
Vc x f	-3,4062	6,516751	0,623514
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-3,7338	6,516751	0,591483
Vc x Material	-3,1963	6,516751	0,644568
f x Método de Aplicação de Fluido	1,2513	6,516751	0,855292
f x Material	3,4887	6,516751	0,615352
Método de Aplicação de Fluido x Material	16,1312	6,516751	0,056160

4.3 Etapa 3: Qualidade dos Furos (Rugosidade)

Os resultados referentes à qualidade dos furos foram baseados na análise gráfica e estatística dos parâmetros de rugosidade monitorados.

As Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 apresentam as medidas das rugosidades Ra, Rt e Rq, respectivamente, ao longo dos ensaios para os diferentes tipos de aplicação de fluido de corte, por jorro e pelo sistema MQF. Pode ser observado destes gráficos que para o mesmo material e sistema de aplicação de fluido de corte todos os parâmetros de rugosidade monitorados mostraram uma mesma tendência, mostrando coerência nos resultados medidos.

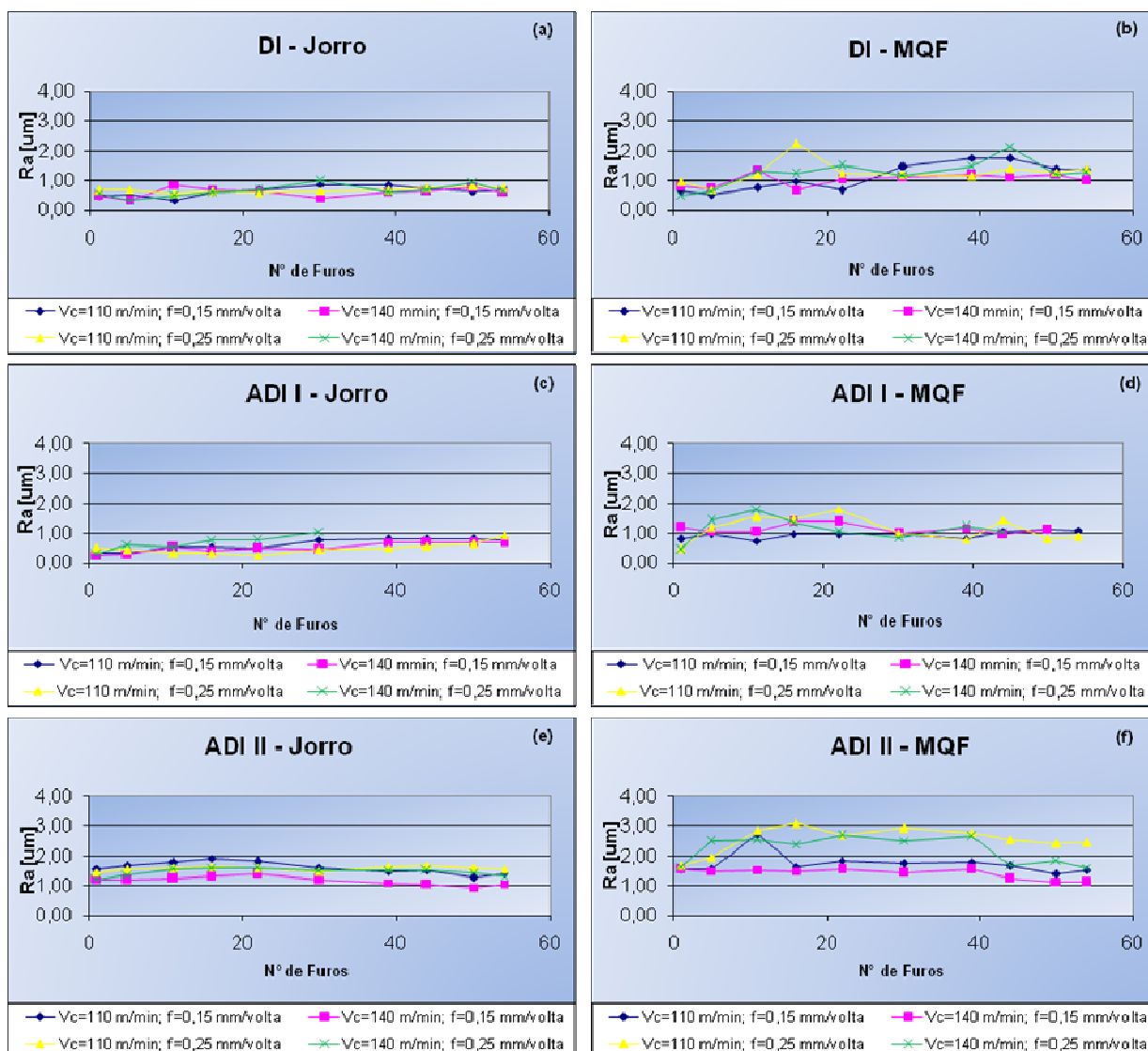


Figura 4.25 - Resultados de Ra ao longo do teste para as diferentes condições de corte para os materiais estudados, (a) Ra para ensaios referentes ao DI com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) Ra para DI com MQF, (c) Ra para ensaios referentes ao ADI I com aplicação de fluido de corte por jorro (d) Ra para ADI I com MQF, (e) Ra para ensaios referentes ao ADI II com aplicação de fluido de corte por jorro e (f) Ra para ADI II com MQF

Da Fig. 4.25 podemos observar uma variação nos valores de Ra para os testes realizados com nodular perlítico (DI) de $0,34\ \mu\text{m}$ até um máximo de $1,00\ \mu\text{m}$ para aplicação de fluido de corte por jorro, e de $0,50\ \mu\text{m}$ até $2,28\ \mu\text{m}$ para MQF. Para os resultados referentes ao ADI I esses valores pularam de $0,27\ \mu\text{m}$ a $1,06\ \mu\text{m}$ para jorro e $0,46\ \mu\text{m}$ a $1,82\ \mu\text{m}$ para MQF, por fim o ADI II apresentou uma variação dos resultados de rugosidade média da ordem de $0,94\ \mu\text{m}$ a $1,93\ \mu\text{m}$ para jorro e $1,11\ \mu\text{m}$ a $3,10\ \mu\text{m}$ para MQF. Estes valores mínimos e máximos de rugosidade podem estar representando níveis de desgaste

da ferramenta de forma a promover os melhores e piores os acabamentos da superfície do furo usinado.

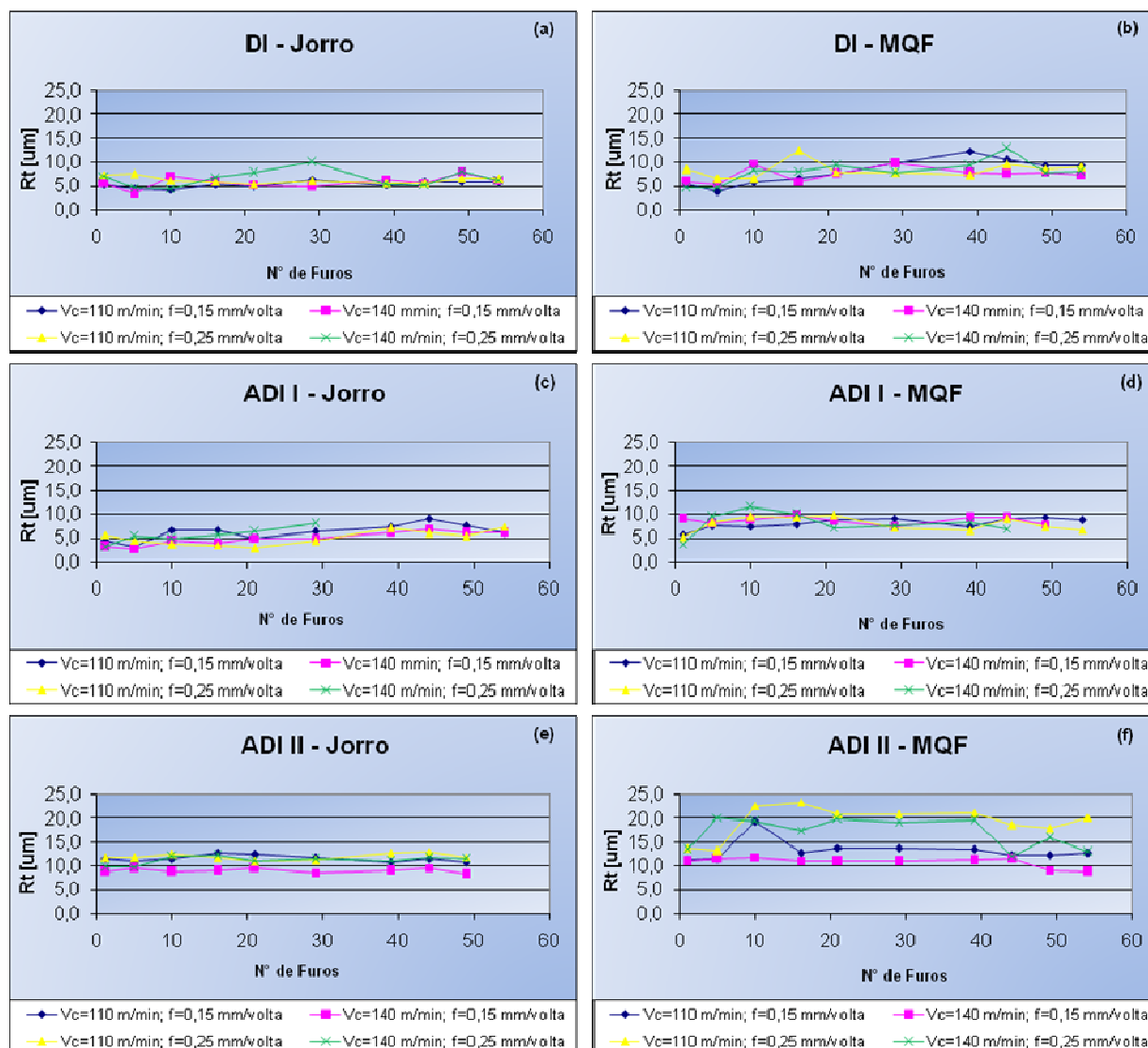


Figura 4.26 - Resultados de R_t ao longo do teste para as diferentes condições de corte para os materiais estudados, (a) R_t para ensaios referentes ao DI com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) R_t para DI com MQF, (c) R_t para ensaios referentes ao ADI I com aplicação de fluido de corte por jorro (d) R_t para ADI I com MQF, (e) R_t para ensaios referentes ao ADI II com aplicação de fluido de corte por jorro e (f) R_t para ADI II com MQF

Para o caso do parâmetro R_t podemos observar da Fig. 4.26 as seguintes variações dos resultados de rugosidade ao longo do teste para os ensaios realizados: (DI) apresentou uma variação em torno de $3,43 \mu\text{m}$ até um máximo de $9,98 \mu\text{m}$ para aplicação de fluido de corte por jorro, e de $3,95 \mu\text{m}$ até $12,95 \mu\text{m}$ para MQF; para o ADI I esses valores pularam de $2,70 \mu\text{m}$ a $8,98 \mu\text{m}$ para jorro e $3,78 \mu\text{m}$ a $11,48 \mu\text{m}$ para MQF; por fim o ADI II apresentou

uma variação dos resultados de R_t da ordem de $8,33\text{ }\mu\text{m}$ a $13,15\text{ }\mu\text{m}$ para jorro e $8,78\text{ }\mu\text{m}$ a $23,50\text{ }\mu\text{m}$ para MQF.

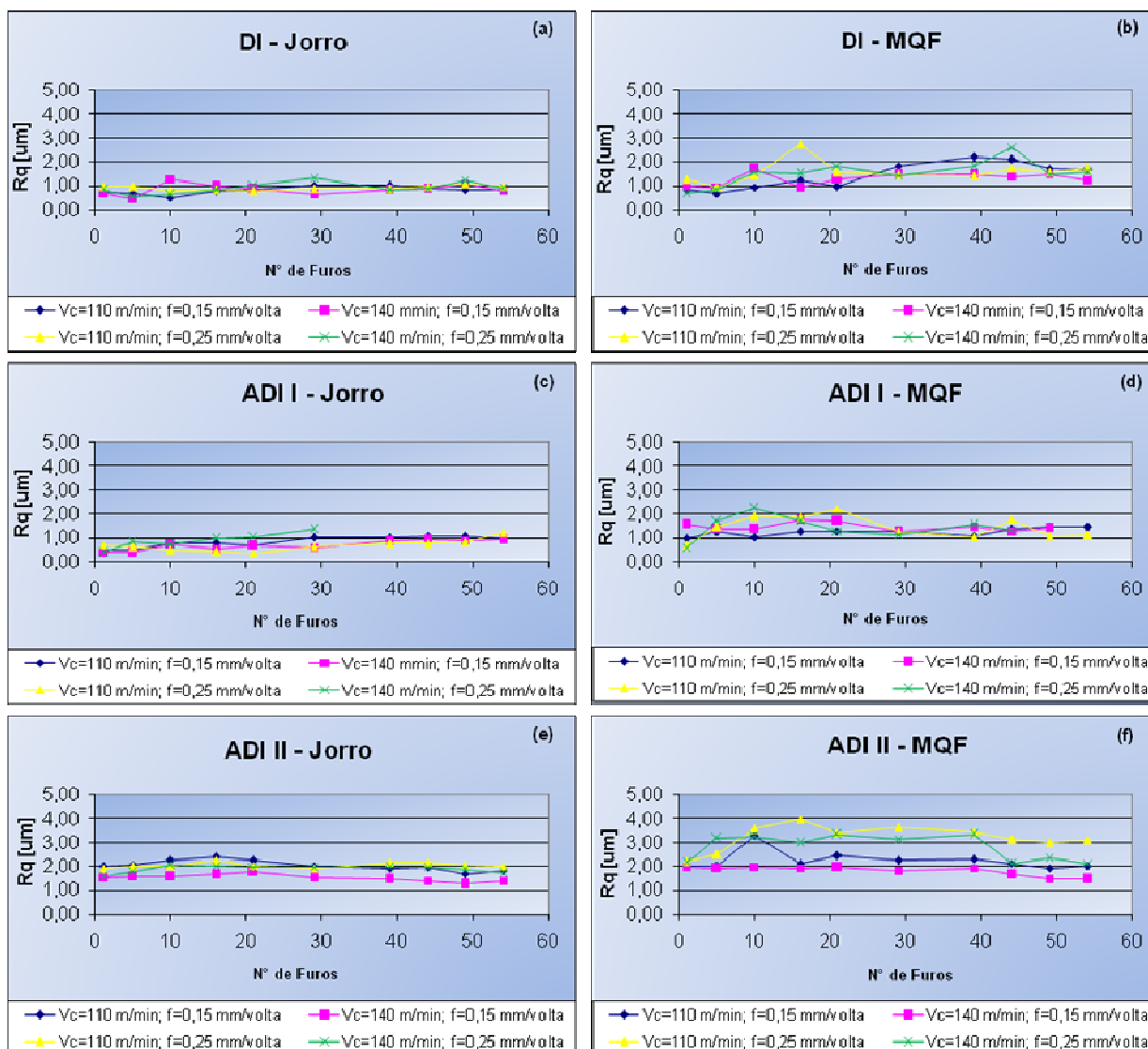


Figura 4.27 - Resultados de R_q ao longo do teste para as diferentes condições de corte para os materiais estudados, (a) R_q para ensaios referentes ao DI com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) R_q para DI com MQF, (c) R_q para ensaios referentes ao ADI I com aplicação de fluido de corte por jorro (d) R_q para ADI I com MQF, (e) R_q para ensaios referentes ao ADI II com aplicação de fluido de corte por jorro e (f) R_q para ADI II com MQF

Para o parâmetro R_q podemos observar da Fig. 4.27 as seguintes variações dos resultados de rugosidade ao longo do teste para os ensaios realizados: (DI) apresentou uma variação em torno de $0,46\text{ }\mu\text{m}$ até um máximo de $1,34\text{ }\mu\text{m}$ para aplicação de fluido de corte por jorro, e de $0,68\text{ }\mu\text{m}$ até $2,75\text{ }\mu\text{m}$ para MQF; para o ADI I esses valores passaram a variar de $0,36\text{ }\mu\text{m}$ a $1,36\text{ }\mu\text{m}$ para jorro e $0,60\text{ }\mu\text{m}$ a $2,25\text{ }\mu\text{m}$ para MQF; por fim o ADI II apresentou

uma variação dos resultados de Rq da ordem de 1,26 μm a 2,39 μm para jorro e 1,48 μm a 3,98 μm para MQF.

A Tabela 4.23 mostra os resultados médios dos parâmetros de rugosidade monitorados, para uma padronização para análise estatística dos resultados. A análise destes dados, portanto, estão sob efeito da influência dos desgastes das brocas. Desta tabela pode-se observar que houve um aumento na rugosidade quando se utilizou MQF, isto pode ser devido ao fato de que este método de aplicação de fluido de corte não tem a função de remover cavaco da zona de corte e sua função lubrificante menos eficiente. Já o fluido de corte aplicado na forma de jorro em abundância apresentou menores valores de rugosidade por apresentar maior capacidade de remover cavacos da região de corte.

Tabela 4.23 - Valores médios de Rugosidade

Material	Vc [m/min]	f [mm/volta]	Fluido de Corte	Ra [μm]	Rq [μm]	Rt [μm]
DI	110	0,15	Jorro	0,64	0,82	5,4
DI	140	0,15	Jorro	0,62	0,85	5,8
DI	110	0,25	Jorro	0,69	0,91	6,3
DI	140	0,25	Jorro	0,65	0,86	5,8
DI	110	0,15	MQF	1,14	1,42	8,1
DI	140	0,15	MQF	1,03	1,29	7,5
DI	110	0,25	MQF	1,28	1,58	8,5
DI	140	0,25	MQF	1,15	1,43	8,0
ADI I	110	0,15	Jorro	0,62	0,84	6,2
ADI I	140	0,15	Jorro	0,52	0,69	5,0
ADI I	110	0,25	Jorro	0,50	0,68	5,1
ADI I	140	0,25	Jorro	0,55	0,74	5,4
ADI I	110	0,15	MQF	0,95	1,25	8,1
ADI I	140	0,15	MQF	1,15	1,47	8,7
ADI I	110	0,25	MQF	1,15	1,44	7,9
ADI I	140	0,25	MQF	1,08	1,39	8,2
ADI II	110	0,15	Jorro	1,60	2,04	11,5
ADI II	140	0,15	Jorro	1,16	1,51	9,0
ADI II	110	0,25	Jorro	1,57	2,06	11,9
ADI II	140	0,25	Jorro	1,45	1,87	10,8
ADI II	110	0,15	MQF	1,75	2,25	13,3
ADI II	140	0,15	MQF	1,41	1,82	10,8
ADI II	110	0,25	MQF	2,54	3,21	19,3
ADI II	140	0,25	MQF	1,90	2,43	14,5

Como pode ser visto na Tab. 4.23, e também nas Figs. 4.28 a 4.33, os maiores valores de rugosidade foram registrados para o ADI II. O ferro fundido nodular (DI) e o ADI I apresentaram resultados muito próximos de qualidade da superfície. Isto se deve às propriedades do material referentes à sua dureza e microestrutura, de forma que o acabamento da superfície será tanto melhor quanto maior a dureza do material, como verificado na literatura (Machado, et al, 2009).

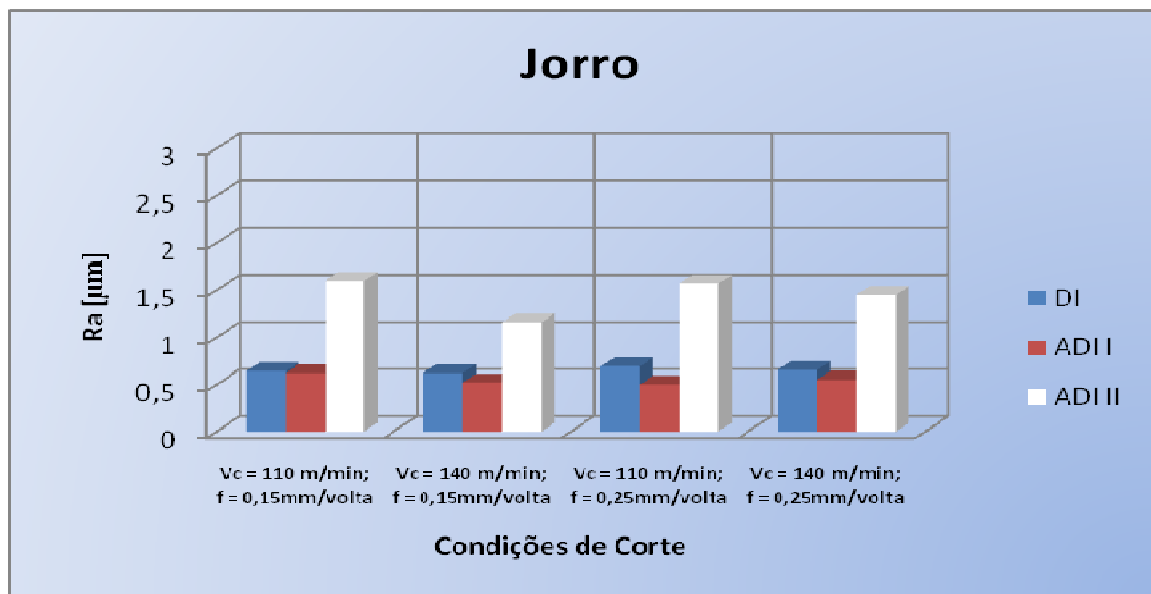


Figura 4.28 - Gráfico comparativo de rugosidade R_a para aplicação de fluido de corte por jorro nas condições de corte estudadas

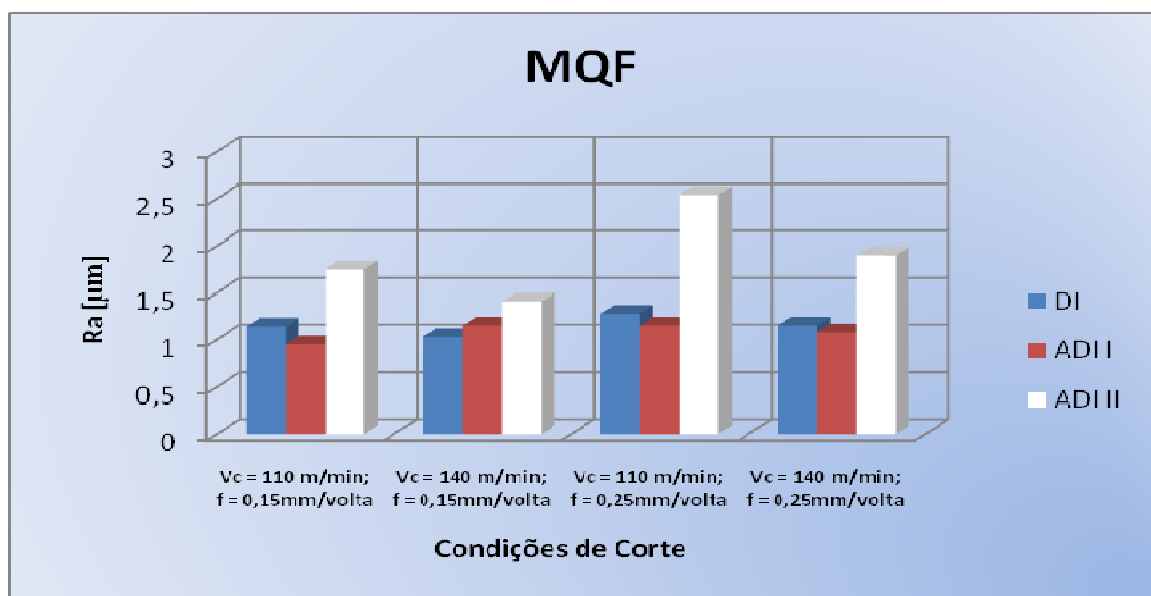


Figura 4.29 - Gráfico comparativo de rugosidade R_a para aplicação de fluido por MQF nas condições de corte estudadas

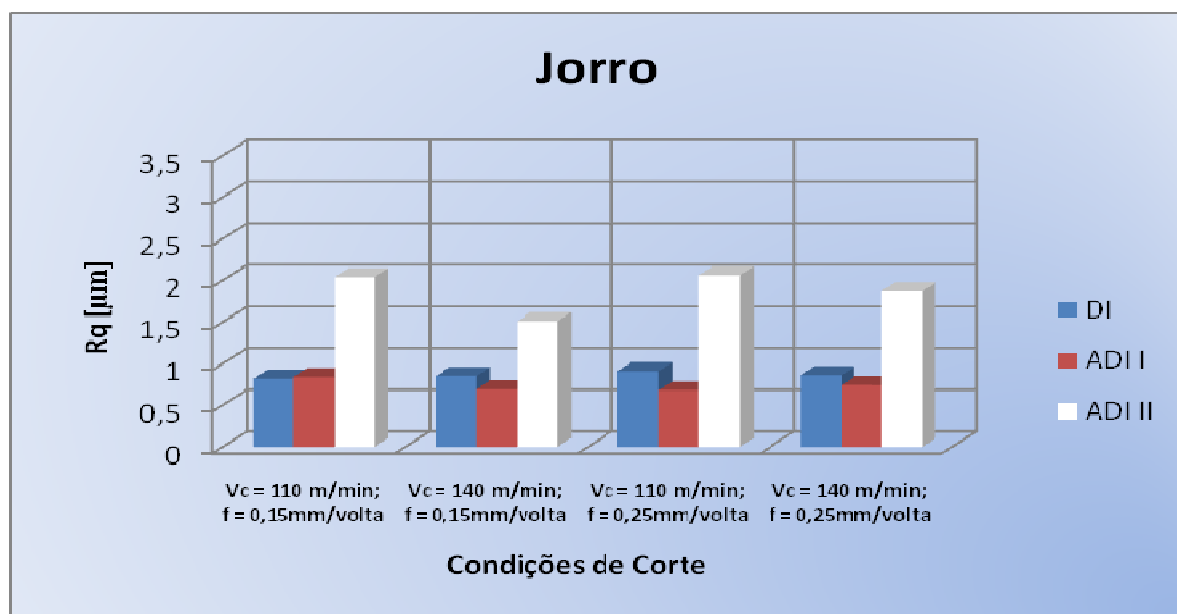


Figura 4.30 - Gráfico comparativo de rugosidade R_q para aplicação de fluido por jorro nas condições de corte estudadas

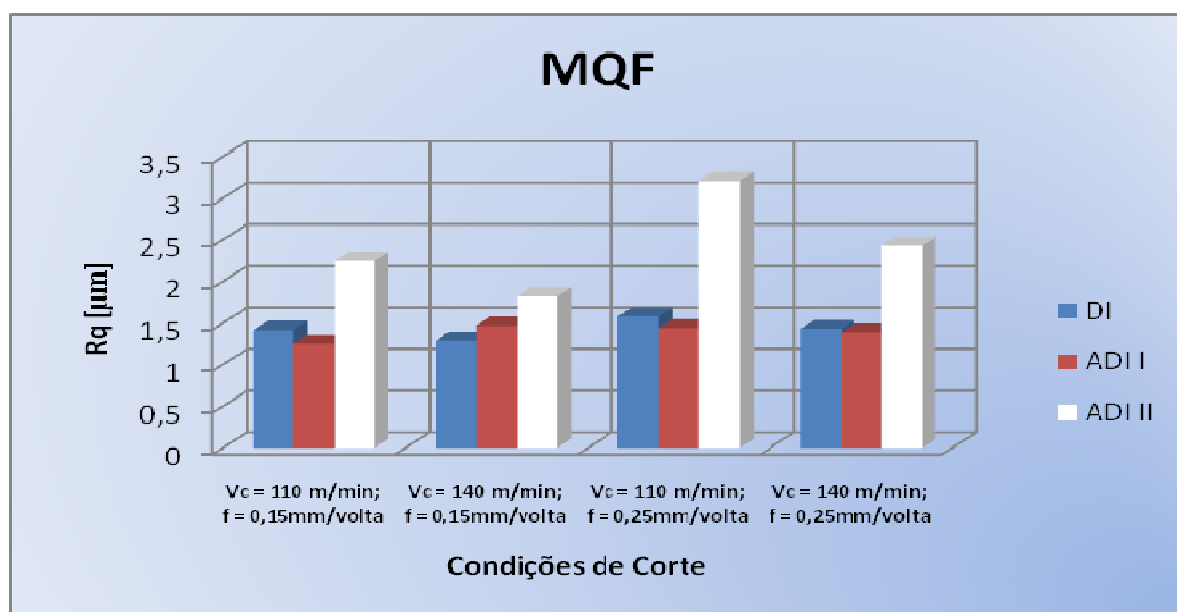


Figura 4.31 - Gráfico comparativo de rugosidade R_q para aplicação de fluido por MQF nas condições de corte estudadas

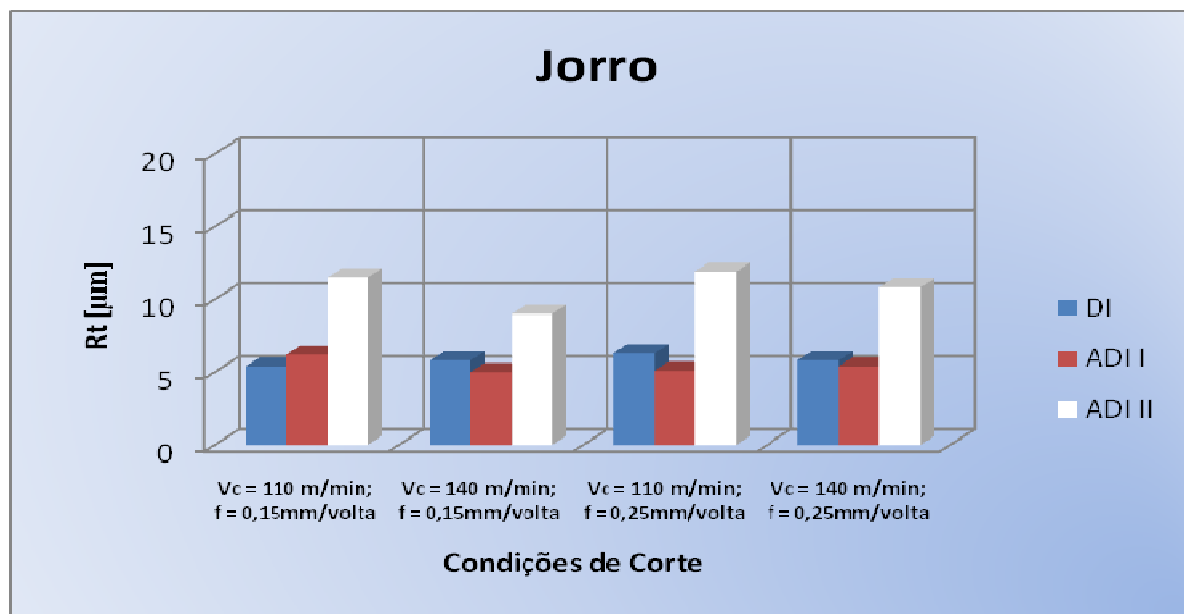


Figura 4.32 - Gráfico comparativo de rugosidade R_t para aplicação de fluido por jorro nas condições de corte estudadas

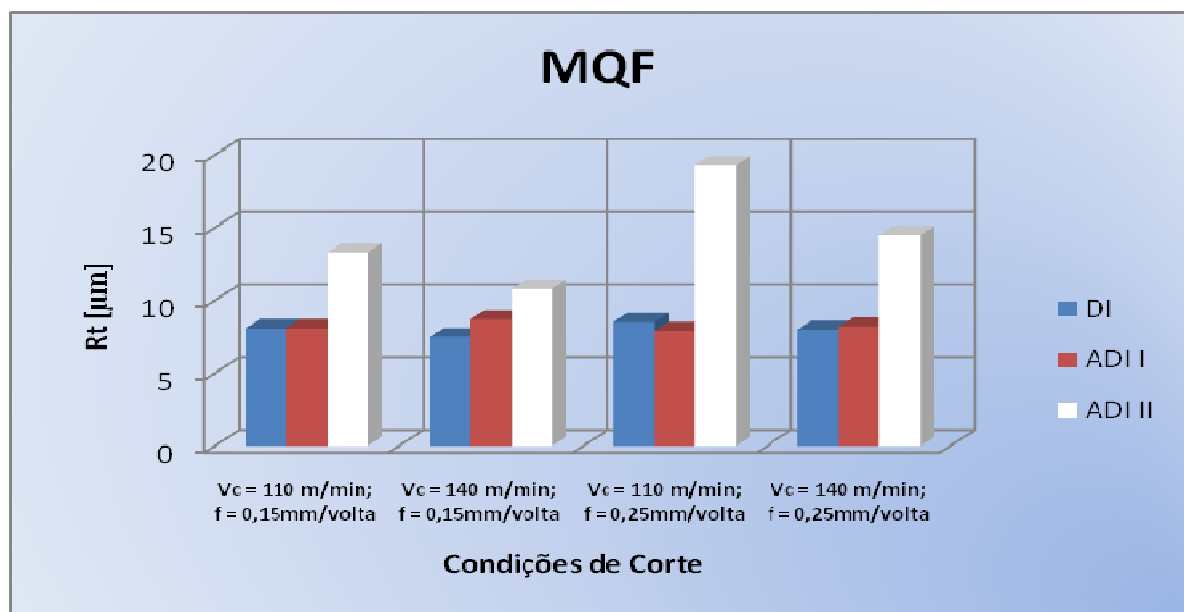


Figura 4.33 - Gráfico comparativo de rugosidade R_t para aplicação de fluido por MQF nas condições de corte estudadas

As Tabelas 4.24 a 4.32 apresentam as análises de significância para a comparação da usinabilidade entre os materiais amostrados e os efeitos das variáveis significativas, utilizando uma confiabilidade de 95% e 5% de nível significância para os parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_t , respectivamente.

Tabela 4.24 - Análise de significância entre ADI I e ADI II, baseado nos valores médios de Ra

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	1,243750	0,033593	0,000000
Vc [m/min]	-0,182500	0,067187	0,026399
f [mm/volta]	0,197500	0,067187	0,018722
Método de Aplicação de Fluido	0,495000	0,067187	0,000079
Material	-0,857500	0,067187	0,000001
Vc x Material	0,202500	0,067187	0,016712
f x Método de Aplicação de Fluido	0,155000	0,067187	0,049922
f x Material	-0,187500	0,067187	0,023532

Tabela 4.25 - Análise de significância entre ADI I e ADI II, baseado nos valores médios de Rq

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	1,60563	0,038991	0,000000
Vc [m/min]	-0,23125	0,077982	0,017997
f [mm/volta]	0,24375	0,077982	0,014106
Método de Aplicação de Fluido	0,60375	0,077982	0,000055
Material	-1,08625	0,077982	0,000001
Vc x Material	0,25125	0,077982	0,012205
f x Método de Aplicação de Fluido	0,17625	0,077982	0,053712
f x Material	-0,24375	0,077982	0,014106

Tabela 4.26 - Análise de significância entre ADI I e ADI II, baseado nos valores médios de Rt

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	9,73125	0,262128	0,000000
Vc [m/min]	-1,36250	0,524255	0,031671
f [mm/volta]	1,31250	0,524255	0,036738
Método de Aplicação de Fluido	3,23750	0,524255	0,000266
Material	-5,81250	0,524255	0,000004
Vc x Material	1,36250	0,524255	0,031671
f x Método de Aplicação de Fluido	0,93750	0,524255	0,111537
f x Material	-1,66250	0,524255	0,013172

Na comparação da usinabilidade entre os ADIs (Tabs. 4.24 a 4.26), a análise mostra que os materiais são significativamente diferentes e que todas as variáveis de entrada influenciam significativamente nos resultados de rugosidade. Nos parâmetros Rq e Rt (Tabs. 4.25 e 4.26) a interação entre o avanço e o método de aplicação de fluido de corte não apresentam influência significativa. Podemos observar que o material é a variável mais

influyente nos resultados de rugosidade devido à diferença de dureza entre os materiais, de forma que ao aumentar a dureza, de 207 HB (ADI II) para 288 HB (ADI I), a rugosidade cai, em média, em 0,85 μm para R_a (Tab. 4.24), 1,08 μm para R_q (Tab. 4.25), e em aproximadamente 5,81 μm para R_t (Tab. 4.26). O mecanismo de aplicação de fluido de corte mostrou-se como a segunda variável mais influente, causando um aumento na resposta quando se passa a utilizar MQF no lugar do jorro, confirmando estatisticamente o que foi afirmado anteriormente, a menor eficiência do método de aplicação por mínima quantidade de fluido na sua ação lubrificante e principalmente de não ser um sistema adequado para ser utilizado com a função de remover cavaco da região do corte. Apesar dos efeitos tanto da velocidade de corte quanto do avanço estarem coerentes com a teoria de que o aumento de V_c leva a redução da rugosidade e elevação do avanço a um pior acabamento da superfície, estes fatores não podem ser analisados separadamente uma vez que suas interações com o material e fluido são significativos, de forma a seguir o efeito das variáveis com maiores efeitos.

As tabelas 4.27 a 4.29 apresentam as análises dos resultados da rugosidade considerando o DI e o ADI II. Como os resultados apresentados para a comparação da usinabilidade dos ADIs, a análise realizada entre o DI e ADI II mostrou resultados semelhantes, de forma que o material e o fluido de corte continuaram como as variáveis mais significativas nas respostas de rugosidade.

Tabela 4.27 - Análise de significância entre DI e ADI II, baseado nos valores médios de R_a

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	1,286250	0,029584	0,000000
V_c [m/min]	-0,230000	0,059168	0,005997
f [mm/volta]	0,235000	0,059168	0,005380
Método de Aplicação de Fluido	0,477500	0,059168	0,000086
Material	-0,772500	0,059168	0,000004
V_c x Método de Aplicação de Fluido	-0,075000	0,059168	0,245487
V_c x Material	0,155000	0,059168	0,034427
f x Método de Aplicação de Fluido	0,150000	0,059168	0,038939
f x Material	-0,150000	0,059168	0,038939

Tabela 4.28 - Análise de significância entre DI e ADI II, baseado nos valores médios de Rq

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	1,64688	0,033534	0,000000
Vc [m/min]	-0,27875	0,067067	0,004261
f [mm/volta]	0,29375	0,067067	0,003235
Método de Aplicação de Fluido	0,56375	0,067067	0,000066
Material	-1,00375	0,067067	0,000001
Vc x Método de Aplicação de Fluido	-0,09375	0,067067	0,204857
Vc x Material	0,20375	0,067067	0,018900
f x Método de Aplicação de Fluido	0,17375	0,067067	0,035909
f x Material	-0,19375	0,067067	0,023353
f x Método de Aplicação de Fluido	0,93750	0,524255	0,111537
Método de Aplicação de Fluido x Material	-1,66250	0,524255	0,013172

Tabela 4.29 - Análise de significância entre DI e ADI II, baseado nos valores médios de Rt

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	9,73125	0,267751	0,000000
Vc [m/min]	-1,36250	0,535503	0,038420
f [mm/volta]	1,31250	0,535503	0,044045
Método de Aplicação de Fluido	3,23750	0,535503	0,000518
Material	-5,81250	0,535503	0,000012
Vc x Material	1,36250	0,535503	0,038420
f x Método de Aplicação de Fluido	0,93750	0,535503	0,123469
f x Material	-1,66250	0,535503	0,017212
Método de Aplicação de Fluido x Material	-0,43750	0,535503	0,440850

No caso da comparação entre DI e ADI I, como visto nos gráficos da Tabs. 4.30 a 4.32, somente na análise de significância baseada em Ra pode-se observar a existência de diferença entre os materiais. Juntamente com os outros parâmetros de rugosidade a única variável que apresentou influência significativa na resposta foi o método de aplicação de fluido de corte, confirmando mais uma vez a menor eficiência das funções do MQF quando comparado com o jorro, conduzindo a uma piora na qualidade da superfície, em média, de 0,51 μ m em Ra, 0,61 μ m em Rq e de 2,5 μ m em Rt.

Tabela 4.30 - Análise de significância entre DI e ADI I, baseado nos valores médios de Ra

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	0,857500	0,016870	0,000000
Vc [m/min]	-0,027500	0,033740	0,441885
f [mm/volta]	0,047500	0,033740	0,202009
Método de Aplicação de Fluido	0,517500	0,033740	0,000001
Material	0,085000	0,033740	0,039854
Vc x f	-0,020000	0,033740	0,571981
Vc x Material	-0,047500	0,033740	0,202009
f x Método de Aplicação de Fluido	0,050000	0,033740	0,181919
f x Material	0,037500	0,033740	0,303091

Tabela 4.31 - Análise de significância entre DI e ADI I, baseado nos valores médios de Rq

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	1,103750	0,024051	0,000000
Vc [m/min]	-0,027500	0,048101	0,592260
f [mm/volta]	0,050000	0,048101	0,346217
Método de Aplicação de Fluido	0,610000	0,048101	0,000054
Material	0,082500	0,048101	0,146983
Vc x f	-0,020000	0,048101	0,694808
Vc x Método de Aplicação de Fluido	0,000000	0,048101	1,000000
Vc x Material	-0,047500	0,048101	0,368746
f x Método de Aplicação de Fluido	0,052500	0,048101	0,324857
f x Material	0,050000	0,048101	0,346217
Método de Aplicação de Fluido x Material	-0,040000	0,048101	0,443536

Tabela 4.32 - Análise de significância entre DI e ADI I, baseado nos valores médios de Rt

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	6,875000	0,125996	0,000000
Vc [m/min]	-0,150000	0,251992	0,577588
f [mm/volta]	0,050000	0,251992	0,850533
Método de Aplicação de Fluido	2,500000	0,251992	0,000178
Material	0,100000	0,251992	0,707859
Vc x f	0,050000	0,251992	0,850533
Vc x Método de Aplicação de Fluido	0,100000	0,251992	0,707859
Vc x Material	-0,150000	0,251992	0,577588
f x Método de Aplicação de Fluido	0,000000	0,251992	1,000000
f x Material	0,400000	0,251992	0,173296
Método de Aplicação de Fluido x Material	-0,300000	0,251992	0,287280

4.4 Etapa 4: Ensaios Complementares

Esta etapa consiste em apresentar as micrografias e os resultados das microdurezas dos ensaios complementares realizados com o intuito de detectar possíveis transformações martensíticas inerentes ao trabalho mecânico originados do processo de furação dos ADIs. As Figuras 4.34 e 4.35 apresentam os gráficos de microdureza que foram obtidos através de identações a partir do ponto mais próximo a parede do furo e espaçadas de 15 μm entre cada identificação, compreendendo num total de dez penetrações, como esquematizado na Fig. 3.20 do capítulo três.

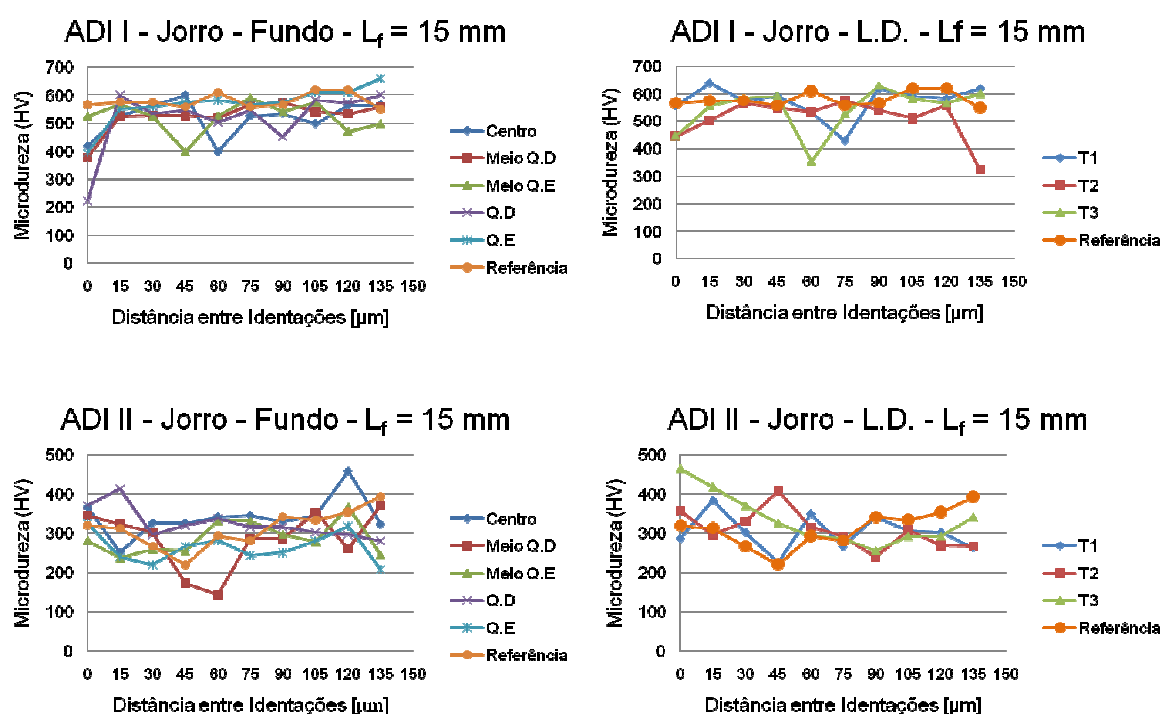


Figura 4.34 - Gráficos de microdureza para os ADIs, com aplicação de fluido de corte por jorro e comprimento de perfuração (L_f) de 15 mm, com dados referentes ao fundo do furo e lateral direita (L.D.), para $V_c = 140 \text{ m/min}$, $f = 0,25 \text{ mm/volta}$

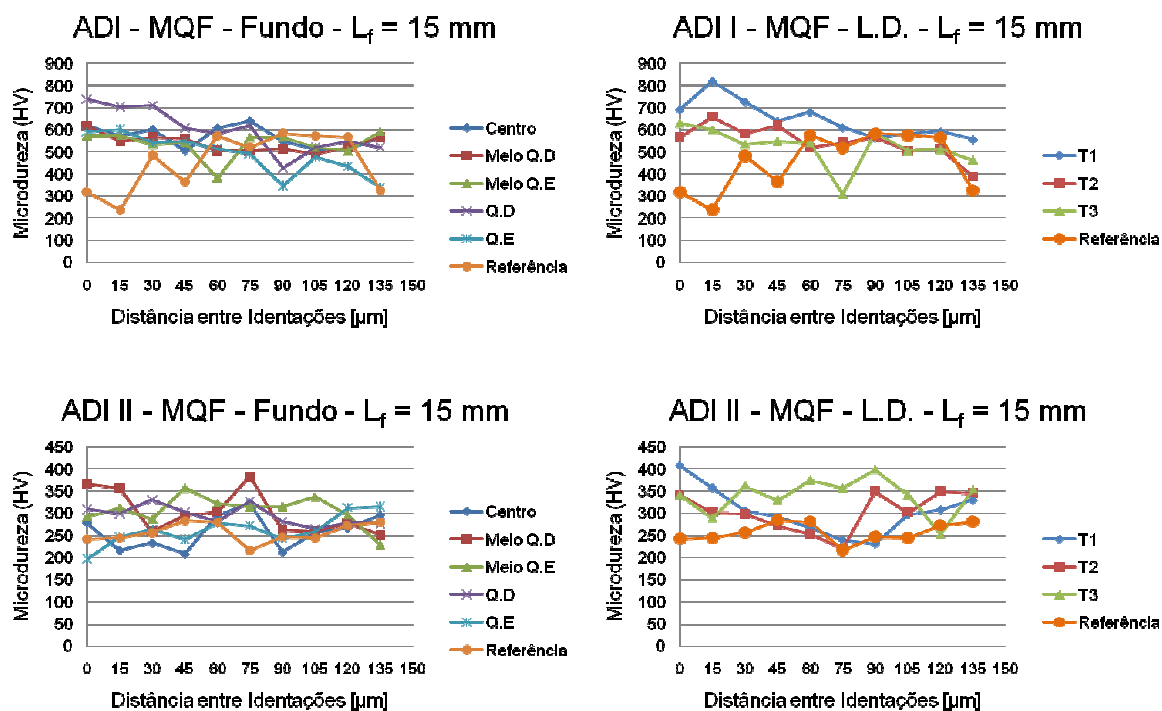


Figura 4.35 - Gráficos de microdureza para os ADIs, com aplicação de fluido de corte por MQF e comprimento de perfuração (L_f) de 15 mm, com dados referentes ao fundo do furo e lateral direita (L.D.), para $V_c = 140$ m/min, $f = 0,25$ mm/volta

As análises dos gráficos de microdureza ao longo das identações (Figs. 4.34 e 4.35) não mostraram nenhuma queda brusca que pudesse confirmar a existência de uma camada martensítica decorrente de trabalho mecânico ocasionado pelo processo de usinagem em questão nas proximidades da parede do furo, apesar de poder ser observado certo encruamento no ADI I quando se utilizou MQF (Fig. 4.35), mas não pode se afirmar que seja característica de transformação martensítica.

Os esquemas com as regiões onde foram registradas as imagens das microestruturas, juntamente com as imagens das microestruturas são apresentadas nas Figs. 4.36 a 4.43.

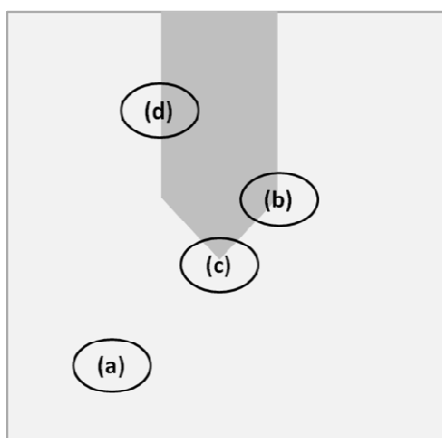


Figura 4.36 - Regiões onde foram registradas as imagens da microestrutura do ADI I com aplicação de fluido de corte por jorro

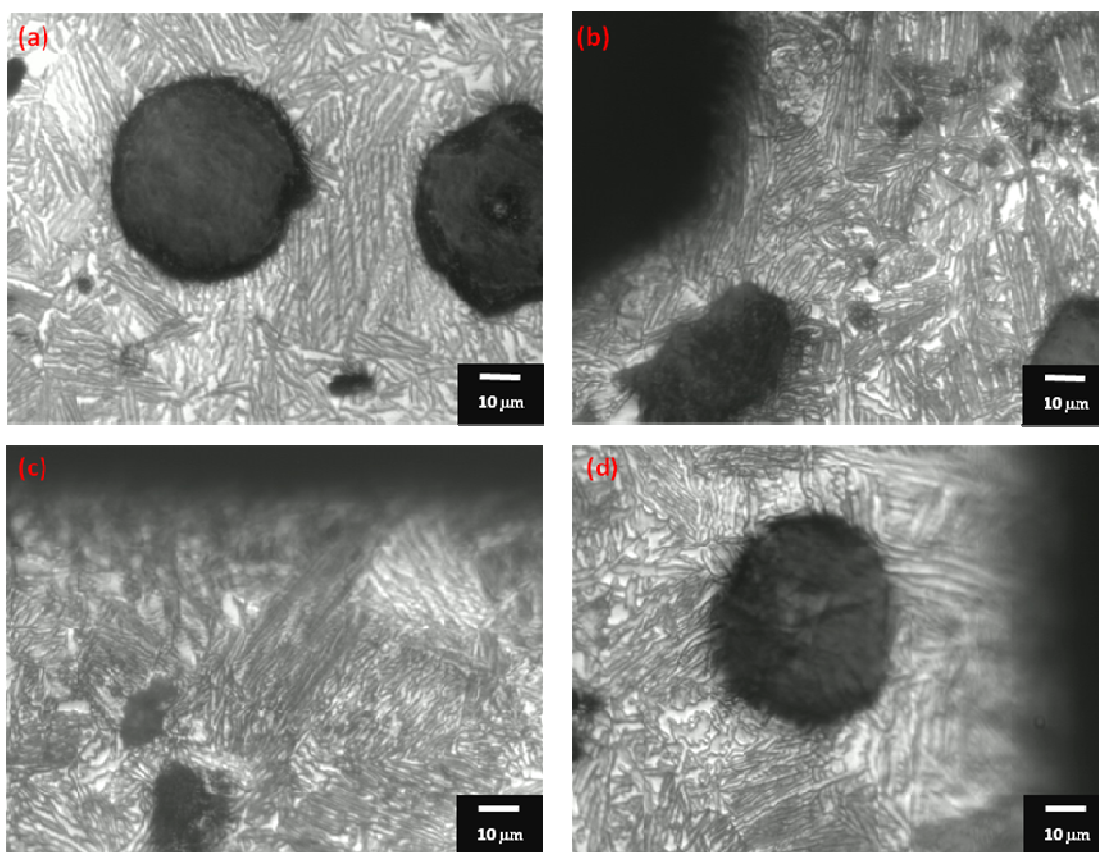


Figura 4.37 - Microestruturas do ADI I para $V_c = 140$ m/min, $f = 0,25$ mm/volta, com aplicação de fluido de corte por jorro e $L_f = 25$ mm; aumento de 40x; (a) referência (meio da amostra), (b) quina direita, (c) fundo do furo, (d) lateral esquerda

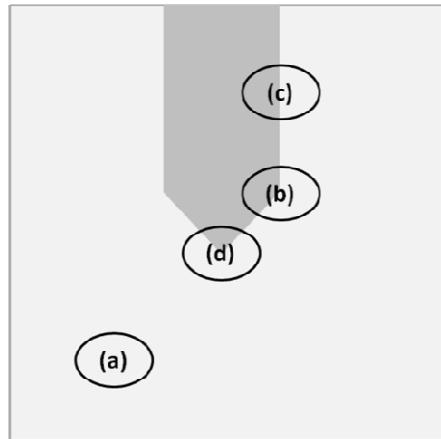


Figura 4.38 - Regiões onde foram registradas as imagens da microestrutura do ADI I com aplicação de fluido de corte por MQF

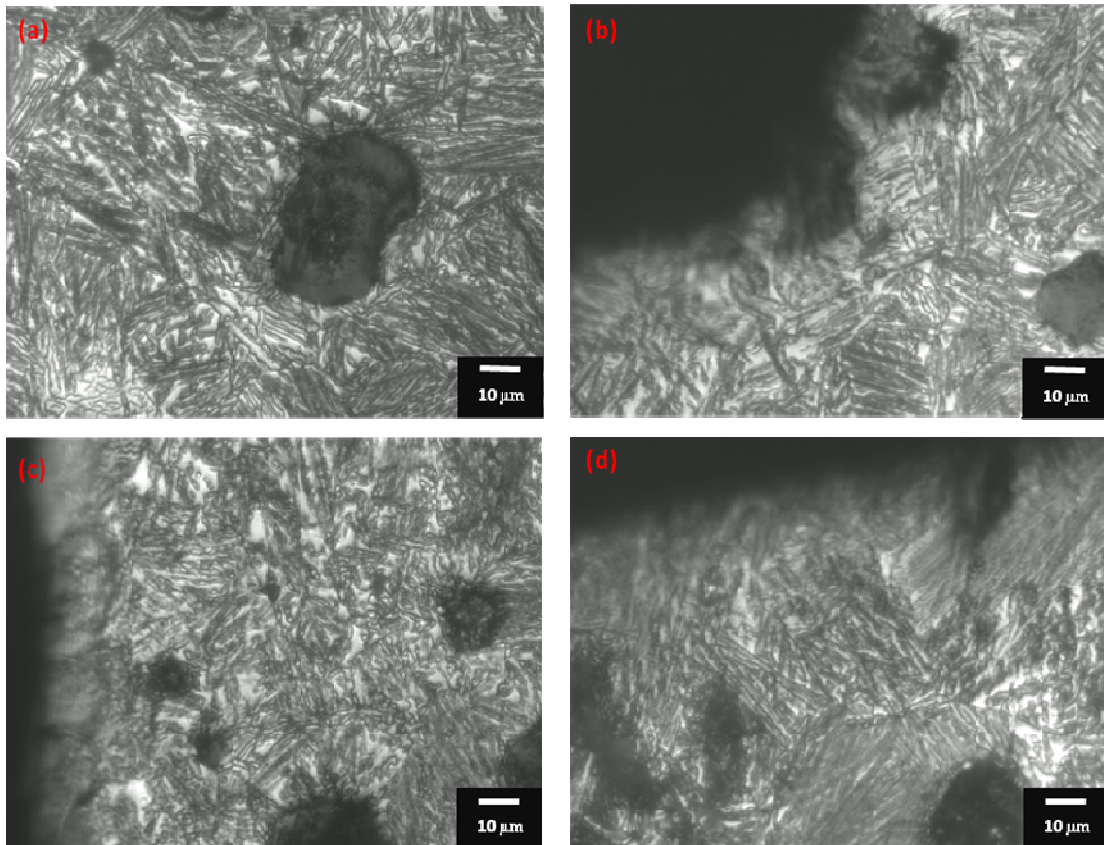


Figura 4.39 - Microestruturas do ADI I para $V_c = 140$ m/min, $f = 0,25$ mm/volta, com aplicação de fluido de corte por MQF e $L_f = 25$ mm; aumento de 40x; (a) referência (meio da amostra), (b) quina direita, (c) lateral direita, (d) fundo do furo

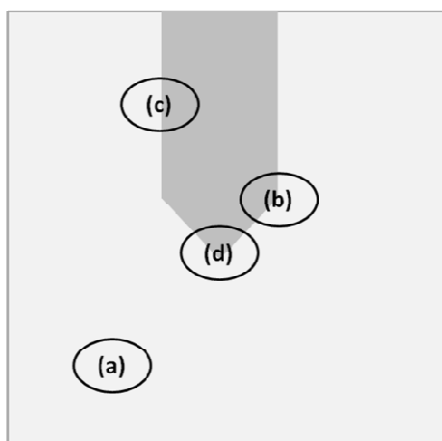


Figura 4.40 - Regiões onde foram registradas as imagens da microestrutura do ADI II com aplicação de fluido de corte por jorro

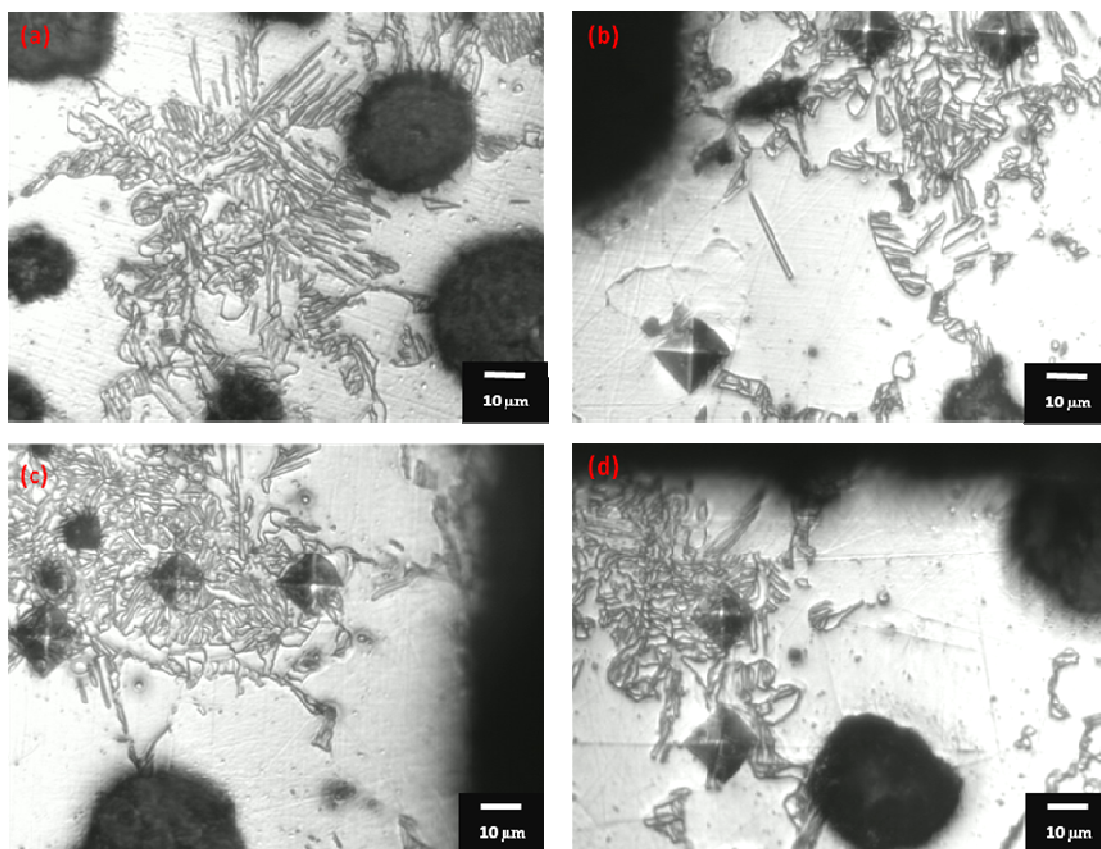


Figura 4.41 - Microestruturas do ADI II para $V_c = 140$ m/min, $f = 0,25$ mm/volta, com aplicação de fluido de corte por jorro e $L_f = 25$ mm; aumento de 40x; (a) referência (meio da amostra), (b) quina direita, (c) fundo do furo, (d) lateral esquerda

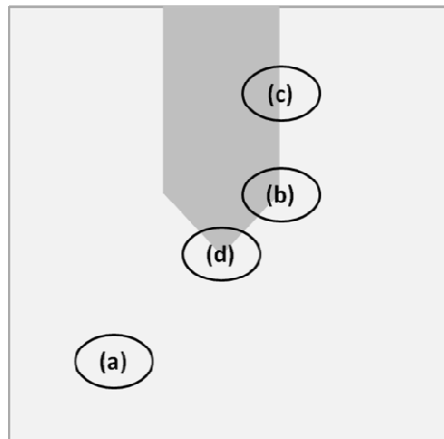


Figura 4.42 - Regiões onde foram registradas as imagens da microestrutura do ADI II com aplicação de fluido de corte por MQF

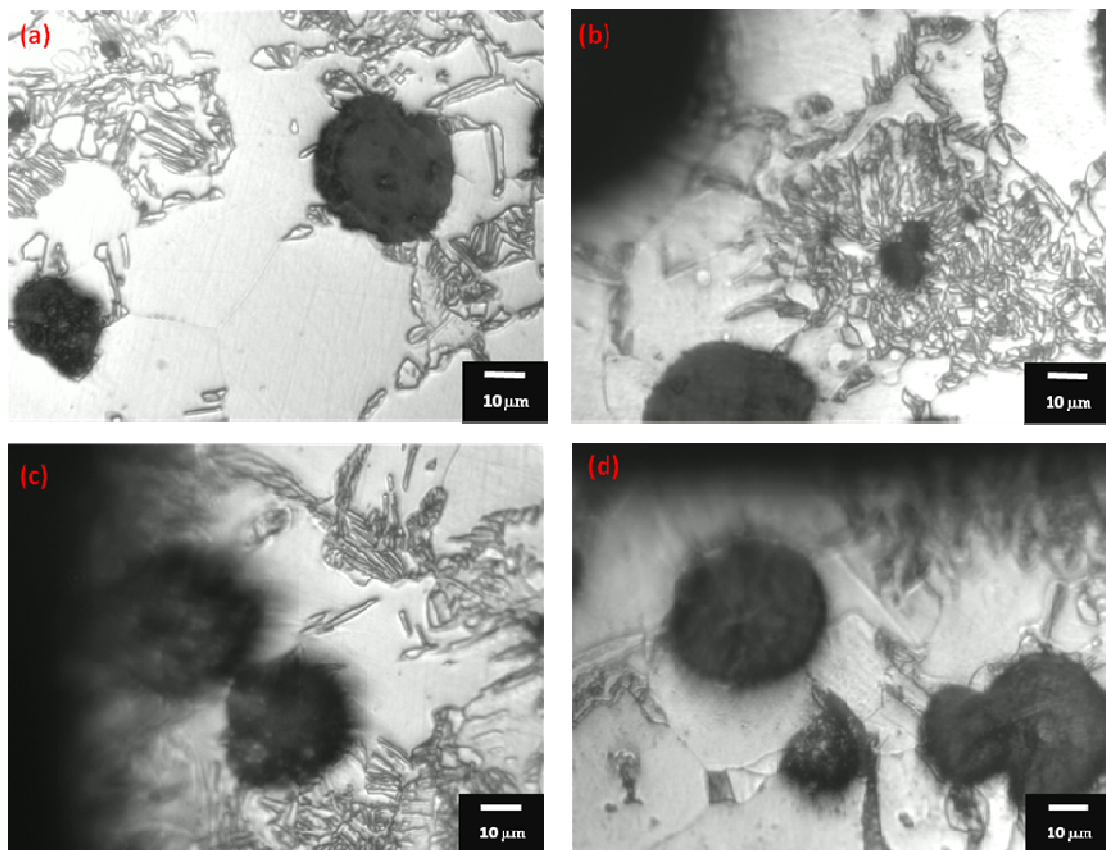


Figura 4.43 - Microestruturas do ADI II para $V_c = 140$ m/min, $f = 0,25$ mm/volta, com aplicação de fluido de corte por MQF e $L_f = 25$ mm; aumento de 40x; (a) referência (meio da amostra), (b) quina direita, (c) lateral direita, (d) fundo do furo

As imagens de microestrutura (Figs. 4.37, 4.39, 4.41 e 4.43) também não confirmam esta possível transformação nos ADIs, de modo que as micrografias próximas as paredes

do furo são idênticas as da região de referência das amostras e muito semelhantes as imagens observadas das amostras registradas no relatório metalográfico disponibilizado pela Tupy S.A, apresentadas nas Figs. 3.2 a 3.4 do capítulo três.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo visa apresentar as conclusões finais bem como propor sugestões de temas para o prosseguimento e aprimoramento do trabalho.

5.1 Conclusões

A partir dos resultados dos testes planejados que foram analisados e discutidos com emprego de ferramentas estatísticas, que proporcionaram alta confiabilidade nas respostas, podemos concluir que:

- A temperatura e tempo de austenitização se mostraram de suma importância na usinabilidade dos ADIs nas condições de corte investigadas, de forma que a maior temperatura e menor tempo em que o material foi submetido ao tratamento térmico proporcionaram uma matriz completamente ausferrítica conferindo maior dureza e conseqüentemente maior dificuldade na usinagem;
- O ADI I (ISO 1.050-6), austenitizado a 900°C por 2 h e austemperado a 360°C por 2h, foi o material que apresentou a pior usinabilidade considerando todos os critérios investigados: comprimento de penetração no ensaio de pressão constante (teste de usinabilidade de curta duração); taxa de desgaste, força de avanço (F_z), torque (M_z), potência de corte e vibração, durante o teste de vida de longa duração; exceto nos resultados de rugosidade, o qual apresentou menores valores devido a maior dureza, quando comparado a outra classe de ferro fundido austemperado;
- O ADI II (ISO 800-10), austenitizado dentro da zona crítica (austenitizado a 780°C por 5h e austemperado a 360°C por 2h), mostrou o melhor desempenho nos critérios de usinabilidade em que foi avaliado, exceto no quesito rugosidade, que apresentou maiores valores devido a sua matriz composta de bainita mais ferrita e resíduos de

perlita fina, conferindo uma menor dureza, mas apesar de valores altos, estes ainda estão dentro da faixa estimada para o processo de furação;

- O DI (ASTM FE 70003), ferro fundido bruto-de-fundição, se mostrou como o material intermediário dentre os três estudados para todos os critérios de usinabilidade avaliados, exceto para o teste de pressão constante em que apresentou resultados melhores que os encontrados para o ADI II;
- As variáveis mais influentes significativamente nos resultados dos testes de pressão constante foram o material, a força de avanço e a interação entre o material e a rotação na comparação entre os ADIs; apenas F_f e a rotação na comparação do DI com o ADI II; e finalmente material, força de avanço, rotação e a interação entre o material e a rotação, na comparação entre o DI e o ADI I;
- Na evolução do desgaste as variáveis que influenciaram significativamente nos resultados de usinabilidade quando se comparou os ADIs foi apenas o material; já na comparação entre o DI e o ADI II as respostas foram influenciadas pela velocidade de corte, pelo material e pela interação destas duas variáveis; na comparação entre o DI e o ADI I a velocidade de corte, o material e a interação entre o avanço e o sistema de aplicação de fluido de corte foram os parâmetros que tiveram influência significativa nas respostas;
- Em geral a força de avanço (F_z) foi influenciada pelas seguintes variáveis: avanço e material na comparação entre os ADIs e entre o DI e o ADI II, e apenas pelo avanço quando se comparou o DI com o ADI I;
- O torque (M_z) foi influenciado significativamente pelo avanço e material na comparação entre os ADIs e DI com ADI I; e pelo avanço, material e pela interação entre a velocidade de corte e o material para o caso do DI contra o ADI II;
- A potência de corte foi influenciada pela velocidade de corte, avanço e material em todas as comparações entre os materiais;
- O sinal de vibração teve a influência significativa da velocidade de corte, do método de aplicação de fluido de corte, do material e da interação entre a velocidade de corte e o material para a comparação entre os ADIs; na comparação entre DI e ADI II as variáveis influentes significativamente foram velocidade de corte, material, sistema lubri-refrigerante, interação entre velocidade de corte e material e interação entre método de aplicação de fluido e material; por fim, apenas a velocidade de corte mostrou-se influente nas respostas de vibração quando se comparou o DI com ADI I;
- Na rugosidade, tanto na comparação entre os ADIs como entre o DI e o ADI II, o parâmetro R_a foi influenciado por todas as variáveis de entrada e R_q e R_t não tiveram influência da interação entre o método de aplicação de fluido de corte e o

material; no caso da comparação entre o DI e o ADI I, a única variável que apresentou influência significativa na resposta foi o método de aplicação de fluido de corte, sendo que em Ra também teve a influência do material, mostrando que a aplicação de fluido de corte pelo método de jorro em abundância melhora a qualidade da superfície dos furos usinados;

- Os valores de rugosidade média Ra mostrou uma variação ao longo do teste de de 0,34 μm até um máximo de 1,00 μm para o DI quando utilizou aplicação de fluido de corte por jorro, e de 0,50 μm até 2,28 μm para MQF. Para o ADI I esses valores variaram de 0,27 μm a 1,06 μm para jorro e 0,46 μm a 1,82 μm para MQF, por fim o ADI II apresentou uma variação dos resultados de rugosidade média da ordem de 0,94 μm a 1,93 μm para jorro e 1,11 μm a 3,10 μm para MQF
- Não houve confirmação de transformação martensítica nas paredes dos furos usinados nas condições de corte mais severas para os ADIs.

5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Para dar continuidade a essa linha de trabalho são propostos alguns temas que completariam a importância desta pesquisa:

- Investigar a melhor geometria de ferramenta para a furação de ADI;
- Estimativa da vida útil da ferramenta através da otimização das condições de corte;
- Estudo das rebarbas na entrada e na saída dos furos, principalmente as originadas depois de desgastes excessivos nas brocas;
- Fazer um estudo baseado na usinagem a seco para comparar com os dados adquiridos do trabalho apresentado;
- Fazer estudo de forças e temperaturas de corte com monitoramento de possíveis transformações martensíticas nestes materiais.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4288 - **Especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: Método do perfil — Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**, 2008.

ABNT NBR ISO 513:2004 E – **Classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas – Denominação dos grupos principais e grupos de aplicação**, 2004.

ANGUS, H. T. **Cast Iron: Physical and engineering properties**. 2. ed. Butterworth, England, 1978, 542 p.

BORK, C. A. S. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1. 4541**. 1995. 127 f. Dissertação de Mestrado –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building**. U.S.A John Wiley & Sons, 1978. 653 p.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CAKIR, M. C.; BAYRAM, A.; ISIK, Y.; SALAR, B. The effects of austempering temperature and time onto the machinability of austempered ductile iron. **Materials Science and Engineering A**, v. 407. p. 147 – 153, July 2005.

CAKIR, M.C.; ISIK, Y. Investigating the machinability of austempered ductile irons having different austempering temperatures and times. **Materials and Design**, v.29. p. 937–942, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7.ed. São Paulo:Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002. 599p.

COSTA, E. S. **Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de corte – MQF**. 2004. 311 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DA SILVA, D.; HUPALO, M. F.; FERRER, M. H.; DE LIMA, N. B. Efeito das Condições **de Austêmpera sobre a Microestrutura de um Ferro Nodular de Classe Ferrítica-Perlítica**. In: **8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA**, 8, Cusco, Peru, Outubro 2007.

DA SILVA, L. C. **Estudo da Rebarba no Fresamento do Faceamento em Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento utilizando Insertos de Cerâmica**. 2004. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DE ANDRADE, C. L. F. **Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duros com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN**. 2005. 170 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DE BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. 2.ed. Editora da Unicamp, Campinas-SP, 1995. 229 p.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais**. 3.ed., São Paulo, Artliber Editora, 2002, 248p.

DO CARMO, D. J. ; DIAS, J. F. **Ferro fundido nodular austemperado**. 1. ed. Belo Horizonte: Perfil Editora, 2001. v.1. 110 p.

ERDOGAN, M.; KILIDI, V.; DEMIR, B.. Transformation characteristics of ductile iron austempered from intercritical austenitizing temperature ranges. **J Mater Sci**. February 2006.

ERTUNC, H. M., LOPARO, K. A., OCAK, H. Tool Wear Condition Monitoring in Drilling Operations Using Hidden Markov Models (HMMs). **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 41. p.1363 - 1384, 2001.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Vol. 1, ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2003. 751p.

GADELMAWLA, E. S; KOURA, M. M, MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H.H, Roughness Parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v.123. p. 133-145, 2002.

GUESSER, W.L.; GUEDES, L. C. Desenvolvimentos Recentes em Ferros Fundidos Aplicados à Indústria Automobilística. **Seminário da Associação de Engenharia Automotiva – AEA**. São Paulo, 1997.

GUESSER, W. L.; HILÁRIO, D. G. Ferros Fundidos Nodulares Perlíticos. **CONAF 99 ABIFA**, São Paulo, Outubro 1999.

GUESSER, W. L.; JUNIOR, D. ; BOEHS, L. ; FRIEDRICH, D. N., Usinabilidade de perfis contínuos de ferros fundidos nodulares das classes FE-45012 e FE-50007. In: SULMAT, 2000, Joinville SC. **SULMAT 2000**, 2000.

GOLDBERG, M.; BERRY, J. T.; LITTLEFAIR, G.; SMITH, G. A Study of the Machinability of an ASTM Grade 3 Austempered Ductile Iron. **World Conference on ADI**. U.S.A , 2002, p. 83-89.

JACINTO, M.C. P. L; MAGALHÃES, A. P. Uma Contribuição para Melhor Avaliar a Correlação Existente entre a Microestrutura e as Características Mecânicas do ADI. **11º Congresso Nacional de Fundição**, Porto, 2003.

KATUKU, K.; KOURSARIS, A.; SIGALAS, I. Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron with PcBN cutting tools under finishing conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 1 – 9, 2008.

KEIGHLEY LABORATORIES LTD.<[http://www. Keighleylabs.co.uk/adi.htm](http://www.Keighleylabs.co.uk/adi.htm) Austempered Ductile Iron > (Acessado em 12 /02/ 2009)

KLOCKE, F.; KLÖPPE, C.; LUNG, D.; ESSIG, C. Fundamental Wear Mechanisms when Machining Austempered Ductile Iron (ADI), *Annals of the CIRP*, v. 56, 73-76, 2007.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen und Bohren**. Springer-Verlag, Berlim – Heidelberg, 1997, 5 Auflage, Band1, 471 p.

LABRECQUE, C.; GAGNÉ, M. Review Ductile Iron: Fifty Years of Continuous Development. *Canadian Metallurgical Quarterly*. v. 37, n. 5. p. 343 – 378, June 1998.

LUSSOLI, R.J. **Efeito da Adição de Cobre e da Seção da Peça Sobre as Características Microestruturais e Mecânicas de Ferro Fundido Nodular Austemperado**. 2003. 85 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MACHADO, Á. R. ; ABRÃO, A. M. ; COELHO, R. T. ; da SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo - SP: Edgard Blucher, 2009. v. 1. 371 p.

MILLS, B.; REDFORD, A. H. **Machinability of Engineering Materials**. Applied Science Publications, 1983

MIN, S.; KIM, J.; DORNFELD, D. A. Development of a Drilling Burr Control Chart for Low Alloy Steel, AISI 4118. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 113. p. 4 – 9, 2001.

MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. 2002. 94 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MOCELLIN, F.; MELLERAS, E.; GUESSER, W. L.; BOEHS, L. Study of The Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process. In: II BRAZILIAN MANUFACTURING CONGRESS, 2, 2003, UBERLÂNDIA, BRAZIL. *ABCM*. v. XXVI. n. 1. p. 22-27, January-March 2004.

NÉRI, M. A.; CARREÑO, C. Effect of copper content on the microstructure and mechanical properties of a modified nodular iron, *Materials Characterization*, v. 51. p. 219-224, September 2003.

NORDTEST NT MECH 038, **Cutting Fluids for Drilling: Evaluation by Drill Life Test**, Published by NORDTEST, 1997.

OERLIKON-BALZERS.< <http://www.oerlikon.com/balzers/>>. (Acessado em 12/02/2009).

PUTATUNDA, S. K.; GADICHERLA, P. K. Influence of austenitizing temperature on fracture toughness of a low manganese austempered ductile iron (ADI) with ferritic as cast structure. **Materials Science and Engineering A**, v. 268. p. 15 - 31, 1999.

SÁ E SOUZA, A. R.; DO CARMO, J.D.; MACHADO, I. M. L.; ARAÚJO, J.C.; FELIPE, R. M. O.; SANTOS, D. B. ADI uma Solução em Transmissão de Potência. **61º Congresso Anual da ABM**, Rio de Janeiro – RJ. 2006.

SANDVIK COROMANT, **High security in aerospace and HRSA with CoroDrill® Delta-C**. Catálogo, 2008

SANTOS, S.C. **Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-Rápido e de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento**. 2002. 200 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SEAH, K. H. W.; SHARMA, S.C. Machinability of alloyed austempered ductile iron. **Int. J. Mach. Tools Manufact.** v. 35. n. 10., p. 1475-1479, March 1994.

SEKER, U; HASIRCI, H. Evaluation of machinability of austempered ductile irons in terms of cutting forces and surface quality. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173. p. 260–268, 2006.

SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**. 3.ed. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, Cap. 7, 1986. p.7.1-7.43.

SORELMETAL. A Design Engineer's Digest of Ductile Iron. **RTZ Iron & Titanium America**. 8th.edition. Montreal, 2002.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W., **Engineering Tribology**. 3.ed. Butterworth Heinemann. 131p., 2005

STEMMER, C. E., **Ferramentas de Corte II**, 2.ed. Florianópolis-SC: UFSC, 1995. 314 p.

TEIXEIRA, C. R. **Benefícios Ecológicos da Redução e Eliminação de Fluidos de Corte nos Processos de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida**. 2001. 153 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

TOKTAS, G.; TAYANÇ, M. AND TOKTAS, A. Effect of matrix structure on the impact properties of an alloyed ductile iron. **Materials Characterization**. v. 57, p. 290-299, February 2006.

TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK. **Machining**. 4.ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearbon, Michigan, 1983, v.1, p. 10.1-10.76.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4.ed., Butterworth, England, 2000, 466p.

TUPY S.A. **Relatório de Laboratório (Análise não Rotineira) – ANR 008/08**. 2008. 5 p. Relatório Metalográfico.

TUPY S.A. <www.tupy.com.br> (Acessado em 12/02/2009)

WEINGAERTNER, W. L., TIKAL, F., DA SILVA, H. R. Rosqueamento por usinagem em ferro fundido nodular. In: **XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM)**, 14, 1997, Bauru - SP.

WU, C. Z.; CHEN, Y. J.; SHIH, T.S. Phase transformation in austempered ductile iron by microjet impact. **Materials Characterization**, v. 48. p. 43–54, March 2002

YIGIT, R.; CELIK, E.; FINDIK, F.; KOKSAL, S. Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, v.26. p. 514 – 524, 2008.

ZHANG, M. Z., LIU, Y. B., ZHOU, H. Wear Mechanism Maps of Uncoated HSS Tools Drilling die-Cast Aluminum Alloy. **Tribology International**, v. 34. p. 727–731, 2001.